



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV MECHANIKY TĚLES, MECHATRONIKY A
BIOMECHANIKY

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF SOLID MECHANICS, MECHATRONICS AND
BIOMECHANICS

ZPRACOVÁNÍ MĚŘENÍ MECHANICKÝCH CHARAKTERISTIK KOVOVÝCH MATERIÁLŮ PŘI MONOTÓNNÍM ZATĚŽOVÁNÍ

EVALUATION OF MECHANICAL CHARACTERISTICS OF METALIC MATERIALS UNDER
MONOTONIC LOADING

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

JAN MIČKA

VEDOUcí PRÁCE
SUPERVISOR

DOC. ING. JANA HORNÍKOVÁ, PH.D.

BRNO 2014

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky

Akademický rok: 2013/14

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

student(ka): Jan Mička

který/která studuje v **bakalářském studijním programu**

obor: **Strojní inženýrství (2301R016)**

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Zpracování měření mechanických charakteristik kovových materiálů při monotónním zatěžování

v anglickém jazyce:

Evaluation of mechanical characteristics of metallic materials under monotonic loading

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Vyhodnocení výsledků experimentálních zkoušek kovových vzorků monotónně namáhaných jednoosým tahem a krutem.

Cíle bakalářské práce:

Porovnání experimentálních záznamů závislostí deformace a zatížení při namáhání jednoosým tahem a krutem.

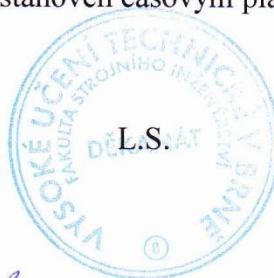
Seznam odborné literatury:

Veles P.: Mechanické vlastnosti a skúšanie kovov, ALFA/SNTL Bratislava, 1985
ČSN EN ISO 6892-1

Vedoucí bakalářské práce: doc. Ing. Jana Horníková, Ph.D.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2013/14.

V Brně, dne 20.11.2013



prof. Ing. Jindřich Petruška, CSc.
Ředitel ústavu

prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc., dr. h. c.
Děkan

Abstrakt:

Tato bakalářská práce se zabývá studiem mechanických charakteristik kovových materiálů při namáhání jednoosým tahem a krutem. Nejdříve jsou v práci popsány napěťové a deformační charakteristiky, které se při zkouškách kovových materiálů určují. Cílem praktické části je potom popsání postupu a určení těchto charakteristik ze zkoušek jednoosým tahem a krutem. Následuje porovnání získaných výsledků.

Klíčová slova:

Napětí, přetvoření, tah, krut, diagram $\sigma - \varepsilon$, diagram $M_k - \varphi$, mez kluzu, Youngův modul pružnosti

Abstract:

This bachelor thesis concerns with study of mechanical characteristic of metallic materials during uniaxial tension and torsion. In the begining of this thesis there are desribed stress and deformation characteristics which are set by metal material tests. Goal of practical part is describition of advancement and determin of these characteristics from uniaxial tension and torsion tests. Then follows compare of gained results.

Key words:

Stress, strain, tensil, torsion, diagram $\sigma - \varepsilon$, diagram $M_k - \varphi$, yield stress, Young's modulus of elasticity

Bibliografické citace

MIČKA, J. *Zpracování měření mechanických charakteristik kovových materiálů při monotónním zatěžování*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2014. 61 s. Vedoucí bakalářské práce doc. Ing. Jana Horníková, Ph.D..

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci na téma Zpracování měření mechanických charakteristik kovových materiálů při monotónním zatěžování vypracoval samostatně pod vedením vedoucí bakalářské práce doc. Ing. Jany Horníkové, Ph.D. a s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který tvoří přílohu této práce.

V Brně dne 28.5.2014

.....

Jan Mička

Poděkování

Děkuji tímto doc. Ing. Janě Horníkové, Ph.D. za cenné připomínky, rady, a obětavost při vypracování této bakalářské práce. Rovněž bych chtěl poděkovat účastníkům semináře Odboru mikromechaniky materiálů a technické akustiky za jejich připomínky a cenné rady k dosavadním výsledkům bakalářské práce. Děkuji také celé své rodině za podporu během mého dosavadního studia.

Obsah

Úvod.....	10
1 Vlastnosti ocelí.....	11
2 Namáhání	12
2.1 Mechanické namáhání	12
2.2 Napjatost tělesa.....	12
2.3 Deformace tělesa	13
2.4 Kritéria mechanického namáhání	15
2.4.1 Stav napjatosti	15
2.4.2 Jednoosý stav napjatosti	15
2.4.3 Víceosý stav napjatosti.....	17
3 Základní mechanické vlastnosti.....	19
3.1 Pružnost	19
3.2 Elastická deformace.....	19
3.3 Moduly pružnosti.....	19
3.4 Plastičnost.....	20
3.4.1 Kritéria plastičnosti	21
3.5 Deformační zpevnění.....	22
3.6 Pevnost.....	24
3.6.1 Konvenční pevnost.....	25
3.6.2 Skutečná pevnost.....	25
3.6.3 Ideální pevnost	26
3.7 Houževnatost	26
4 Zkouška tahem	27
4.1 Zkušební tyče.....	27
4.1.1 Rozdělení zkušebních tyčí.....	27
4.2 Zkušební podmínky	27
4.2.1 Způsob upnutí tyče	27
4.2.2 Rychlost zatěžování.....	29
4.2.3 Jemnost krystalizace.....	29
4.2.4 Neutronové ozařování	29
4.3 Provedení zkoušky.....	29
4.3.1 Lom při tahové zkoušce	30
4.4 Napětíové charakteristiky.....	30
4.4.1 Modul pružnosti	31
4.4.2 Mez pružnosti.....	31
4.4.3 Mez úměrnosti.....	31
4.4.4 Mez kluzu.....	32
4.4.5 Mez pevnosti	34
4.5 Deformační charakteristiky	34
4.5.1 Tažnost	34
4.5.2 Kontrakce	34
5 Zkouška krutem	36
5.1 Mechanické charakteristiky	37
6 Statistické zpracování	39
6.1 Nejistoty měření	39
6.2 Test hypotézy.....	39
7 Charakteristiky tahové zkoušky.....	41
7.1 Zkoušený materiál	42

7.2	Mez kluzu	43
7.3	Mez pevnosti.....	44
7.4	Mez úměrnosti	44
7.5	Modul pružnosti.....	46
7.6	Tažnost.....	46
7.7	Kontrakce.....	46
7.8	Exponent a koeficient deformačního zpevnění	47
7.9	Výsledky tahové zkoušky	48
8	Charakteristiky zkoušky krutem	49
8.1	Mez kluzu	49
8.2	Mez pružnosti	52
8.3	Modul pružnosti ve smyku	53
	Výsledky zkoušky krutem	54
8.4	Porovnání výsledků	54
	Závěr.....	56
	Seznam použitých zdrojů	57
	Seznam použitých symbolů a zkratk	59

Úvod

Mechanické vlastnosti jsou takové vlastnosti materiálů, které určují jeho vhodnost a využití v praxi. Poznání a zlepšení těchto vlastností je klíčem k jejich optimálnímu využití.

Díky svým specifickým vlastnostem jsou kovy nenahraditelnými konstrukčními materiály. I když jsou kovy z hlediska zpracování energeticky i surovinově náročné, stále se hledají cesty k zefektivnění jejich výroby a využití. Kovové materiály však musí mít, i přes stále rostoucí požadavky na zlepšení a nové vlastnosti, zaručenou bezpečnost, spolehlivost a životnost. Nedodržení těchto předpokladů může mít fatální následky. Příkladem je náhlé porušení konstrukce mostu u města Hasselt v Belgii ve 30. letech minulého století. Dalším příkladem je rozlamování nákladních lodí Liberty používaných během 2. světové války.

Tyto a mnoho dalších katastrof vedlo k hlubšímu zkoumání a pozorování mechanických vlastností kovů jako konstrukčních materiálů. Cílem studia mechanických vlastností je pak neustálé zlepšování a možnost poskytnout konstruktérovi co možná nejpřesnější údaje o materiálu, který se právě chystá použít. Z toho důvodu se musí materiálové zkoušky stále zpřesňovat a zdokonalovat, což umožňuje prudký rozvoj techniky v posledních letech [1].

1 Vlastnosti ocelí

Vlastnosti jsou takové stránky předmětů a jevů, které člověk pozoruje, zkoumá a posuzuje z hlediska svého zájmu a potřeby [1].

Výběr materiálu pro výrobu různých součástí a stavbu konstrukcí a zařízení je založen na mechanických, technologických, fyzikálních a chemických vlastnostech materiálu, jejichž znalost je velmi důležitá a slouží k rozboru těch vlastností, které jsou pro daný účel nejdůležitější [2].

Oceli, jakožto konstrukční materiály, mají široké uplatnění díky svým typickým mechanickým vlastnostem jako je pružnost, pevnost, plastičnost a houževnatost. Tyto vlastnosti a mnoho dalších vyplývají ze struktury oceli a jejího složení.

Ocel je obecně slitina železa a uhlíku do obsahu 2,1 %. Oceli mohou obsahovat i další legující prvky. Nejvýznamnější jsou však vlastnosti ocelí ovlivňovány uhlíkem. Mezi legující prvky pak patří zejména tyto: Mn, Ni, Cr, Si, Cu a Mo. Další prvky se pak do oceli mohou dostat při výrobě, avšak jejich účinky na vlastnosti ocelí bývají zpravidla nežádoucí. Tyto prvky jsou označovány za doprovodné, pokud jejich koncentrace nepřekročí předepsanou hranici. Nad touto hranicí jsou označovány za legující prvky. Mezi tyto prvky patří např. S, B, O, N a P [3].

2 Namáhání

Pod pojmem namáhání všeobecně rozumíme proces, při kterém dochází k interakci mezi silami nebo činiteli namáhání a namáhaných objektů. Výsledkem tohoto procesu jsou dočasné (vratné) nebo trvalé (nevratné) změny stavu namáhaného objektu.

Namáhání můžeme podle povahy a fyzikální podstaty sil rozdělit na

- mechanické
- fyzikální
- chemické
- tepelné

Dále se již budu zabývat pouze mechanickým namáháním [1, 4, 5].

2.1 Mechanické namáhání

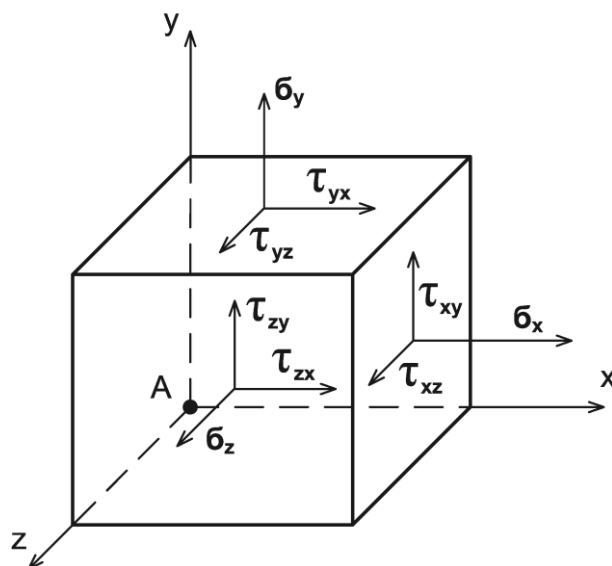
Mechanické namáhání je takové namáhání, při kterém na těleso působí vnější síly, které těleso pružně (deformace po odtížení vymizí) nebo pružně-plasticky (po odtížení vymizí pouze část deformace – elastická) deformují v závislosti od míry vnitřního odporu materiálu tělesa [1, 5].

2.2 Napjatost tělesa

Napjatost v bodě tělesa A je množina všech obecných napětí \vec{f}_A a jeho složek σ (normálové napětí), τ (smykové napětí), které působí ve všech řezech procházejících tímto bodem a je určena tenzorem napětí (1) v tomto bodě. Napjatost tělesa je pak množina napjatostí ve všech bodech tělesa a je určena množinou tenzorů napětí pro všechny body tělesa.

Napjatost tělesa lze označit jako homogenní, pokud je napjatost ve všech těchto bodech shodná. V opačném případě označujeme napjatost tělesa za nehomogenní [6, 7].

$$T_{\sigma} = \begin{pmatrix} \sigma_x & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{xy} & \sigma_y & \tau_{zy} \\ \tau_{xz} & \tau_{zy} & \sigma_z \end{pmatrix} \quad (1)$$



Obr. 2.1 Rozložení normálových a smykových napětí na povrchu elementární krychle [7]

2.3 Deformace tělesa

Deformace v bodě tělesa je definována jako deformace elementárního prvku tělesa, který tento bod obsahuje. Deformace tělesa je potom definována jako množina všech deformačních posuvů ve všech bodech tělesa.

Deformaci v obecném bodě tělesa je popsána tenzorem přetvoření

$$T_{\varepsilon} = \begin{pmatrix} \varepsilon_x & \frac{\gamma_{xy}}{2} & \frac{\gamma_{xz}}{2} \\ \frac{\gamma_{xy}}{2} & \varepsilon_y & \frac{\gamma_{zy}}{2} \\ \frac{\gamma_{xz}}{2} & \frac{\gamma_{zy}}{2} & \varepsilon_z \end{pmatrix} \quad (2)$$

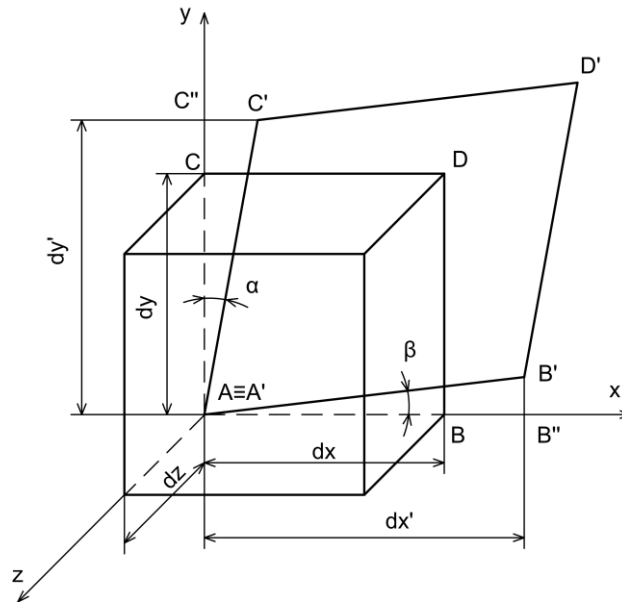
kde $\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z$ jsou délková přetvoření, která popisují změnu rozměrů elementu tělesa a $\gamma_{xy}, \gamma_{xz}, \gamma_{zy}$ jsou úhlová přetvoření (zkosy), která popisují změnu tvarů elementu tělesa.

Pokud element tělesa definujeme jako nekonečně malý prvek tělesa a prvek tělesa jako každou oddělitelnou část tělesa, potom můžeme psát

$$\varepsilon_x = \frac{\psi - dx}{dx} \quad \varepsilon_y = \frac{dy' - dy}{dy} \quad \varepsilon_z = \frac{dz' - dz}{dz} \quad (3)$$

a

$$\gamma_{xy} = \alpha + \beta \quad \gamma_{zy} = \gamma + \delta \quad \gamma_{xz} = \varepsilon + \psi \quad (4)$$



Obr. 2.2 Relativní změna rozměrů a tvaru elementu [7]

Deformaci v bodě tělesa můžeme považovat za homogenní, jestliže jsou tenzory přetvoření ve všech bodech tělesa totožné. V opačném případě je deformace v bodě tělesa nehomogenní [6, 7].

Deformaci dělíme na pružnou (elastickou) ε_{el} , která po odtížení z tělesa vymizí a trvalou (plastickou) ε_{pl} , která v tělese zůstává i po odtížení.

Celkovou deformaci můžeme vyjádřit jako součet deformace elastické a plastické

$$\varepsilon = \varepsilon_{el} + \varepsilon_{pl} \quad (5)$$

Deformaci dále dělíme na podélnou a příčnou.

Podélná deformace je definovaná jako poměr změny délky tělesa k jeho původní délce a vyjadřuje se smluvně pomocí tzv. poměrného prodloužení

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0} = \frac{L_0 - L}{L_0} = 1 - \frac{L}{L_0} \quad (6)$$

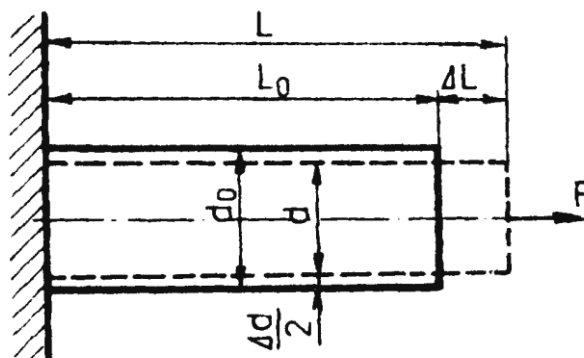
kde ΔL je prodloužení ve směru působícího napětí a L_0 je počáteční délka tělesa.

Příčná deformace je naopak poměrem změny příčného rozměru tělesa k původnímu příčnému rozměru a vyjadřuje se smluvně pomocí tzv. příčného prodloužení

$$\psi = \frac{\Delta S}{S_0} = \frac{S_0 - S}{S_0} = 1 - \frac{S}{S_0} = \frac{d_0 - d}{d_0} = 1 - \frac{d}{d_0} \quad (7)$$

kde ΔS je změna příčného průřezu a S_0 je počáteční příčný průřez tělesa.

Poměrná pružná deformace v příčném směru je stejně jako podélná pružná deformace přímo úměrná napětí podle Hookova zákona. Poměr obou deformací se vyjadřuje jako Poissonův poměr (Poissonovo číslo).



Obr. 2.3 Změna rozměrů válcovitého tělesa při jednoosém tahu [1]

$$\mu = -\frac{\psi}{\varepsilon} \quad (8)$$

Záporné znaménko vyjadřuje opačný směr deformace ψ .
Poissonovo číslo nabývá u kovů hodnot

$$0,25 < \mu < 0,5 \quad (9)$$

pro ocel $\mu = 0,3$ [1, 5].

2.4 Kritéria mechanického namáhání

Interakcí mezi působícími silami a odporem tuhého tělesa vzniká v tělese určitý stav napjatosti. Podle dynamičnosti namáhání může být toto namáhání časově neproměnné, tj. statické, nebo se může s časem měnit, tj. dynamické. Oba uvedené faktory představují kritéria mechanického namáhání, kterými ho můžeme jednoznačně určit a kvantifikovat.

Kritérii mechanického namáhání jsou tedy stav napjatosti a časové kritérium napjatosti.

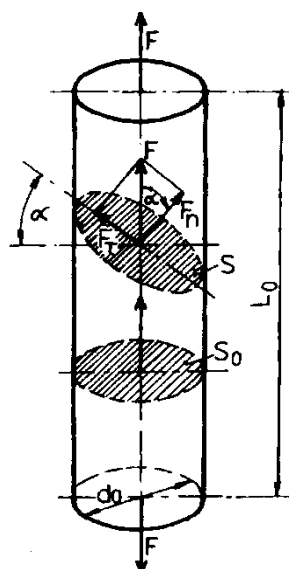
Napjatost určuje rozložení vektorů normálových a smykových složek napětí v objemu tělesa a je důležitou charakteristikou, která se používá při posuzování mezních stavů materiálu a konstrukce [1, 5].

2.4.1 Stav napjatosti

Stavem napjatosti vyjadřujeme počet, druhy a průběhy napětí, které působí na těleso. Stav napjatosti může být buď jednoosý, nebo víceosý [1].

2.4.2 Jednoosý stav napjatosti

Jednoosý stav napjatosti je takový stav napjatosti, když na těleso působí pouze jedno hlavní napětí a ostatní napětí jsou nulová, např. jednoosý tah nebo jednoosý tlak.



Obr. 2.4 Rozložení sil v průřezu válcového tělesa při jednoosém tahu [1]

V libovolném řezu zkušební tělesa (tyče) S bereme napětí rovnoměrně rozložené a jeho velikost můžeme vyjádřit smluvně vztahem.

$$\sigma = \frac{F}{S} \quad (10)$$

Hlavní normálové napětí bude v řezu S_0 , který je kolmý na směr zatěžujících sil F

$$\sigma_0 = \frac{F}{S_0} \quad (11)$$

řez S_0 je v našem případě kruhový a jeho velikost je

$$S_0 = \frac{\pi \cdot d_0^2}{4} \quad (12)$$

kde d_0 je počáteční příčný průměr.

Řez S lze vyjádřit jako poměr řezu kolmého na směr zatěžující síly a úhlu α , který mezi sebou svírá normálová složka síly F_n s osou vzorku.

$$S = \frac{S_0}{\cos \alpha} \quad (13)$$

Sílu F , která působí v ose vzorku, lze rozložit na složku kolmou na rovinu řezu F_n a složku ležící v rovině řezu F_τ .

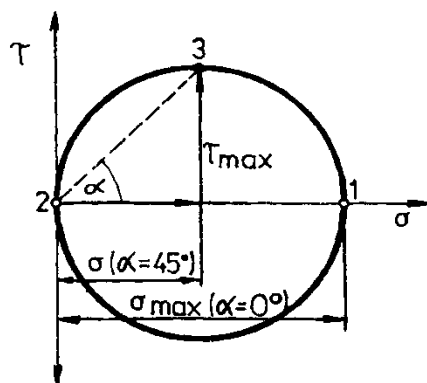
Normálové napětí v řezu S pak bude

$$\sigma = \frac{F_n}{S} \quad (14)$$

A smykové napětí bude

$$\tau = \frac{F_{\tau}}{S} \quad (15)$$

Jednoosý stav napjatosti můžeme graficky vyjádřit v Mohrově rovině (Obr. 2.5) [1, 5, 7].



Obr. 2.5 Mohrova kružnice pro jednoosý stav napjatosti [1]

2.4.3 Víceosý stav napjatosti

Napjatost můžeme znázornit v libovolném bodě tělesa pomocí normálových a tečných složek napětí, které působí na plošky myšlené elementární krychle. Z toho plyne, že obecně v prostoru je napjatost určena třemi normálovými a třemi smykovými složkami.

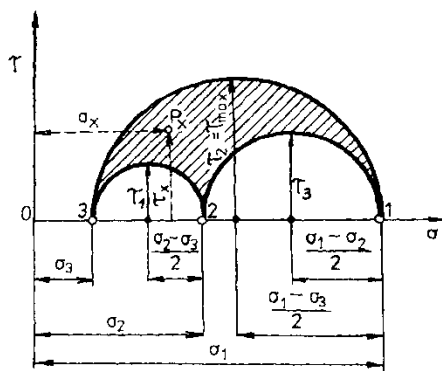
Napjatost můžeme zjednodušit natočením elementárního prvku tak, že na její stěny budou působit pouze normálová napětí $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$, která nazýváme hlavní normálová napětí a pro která platí

$$\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3 \quad (16)$$

Smyková napětí budou na stěnách kostky v tomto případě nulová, ale budou existovat uvnitř kostky. Jejich velikost můžeme vyjádřit vztahy

$$\tau_1 = \frac{\sigma_2 - \sigma_3}{2} \quad \tau_2 = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \quad \tau_3 = \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2} \quad (17)$$

Víceosou napjatost můžeme rovněž zobrazit v Mohrově rovině



Obr. 2.6 Mohrova kružnice pro trojosý tah [1]

Ve směrech hlavních napětí vznikají hlavní poměrně pružné deformace, jejichž velikost můžeme vyjádřit pomocí Hookova zákona.

$$\begin{aligned}\varepsilon_1 &= \frac{1}{E}[\sigma_1 - \mu(\sigma_2 + \sigma_3)] \\ \varepsilon_2 &= \frac{1}{E}[\sigma_2 - \mu(\sigma_1 + \sigma_3)] \\ \varepsilon_3 &= \frac{1}{E}[\sigma_3 - \mu(\sigma_1 + \sigma_2)]\end{aligned}\tag{18}$$

[1]

3 Základní mechanické vlastnosti

3.1 Pružnost

Pružnost (elasticita) je obecně definovaná jako schopnost materiálu pružně se deformovat před porušením. Ve své fyzikální podstatě je pružnost změna stavu materiálu, která nastává při působení mechanických sil a která se navenek projevuje deformací jeho objemu. Pružnost je proces vratný, tedy po odtížení se rozměry tělesa vrátí do původního stavu [1, 4, 5].

3.2 Elastická deformace

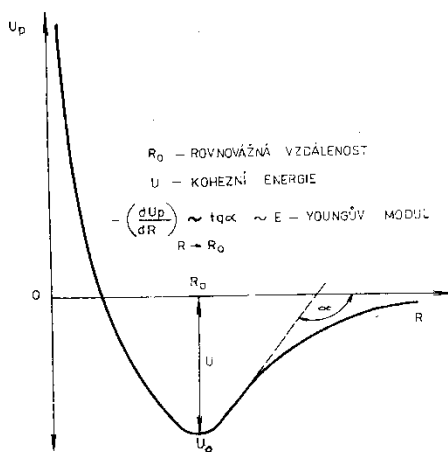
Elastická deformace je deformace vratná, která po odtížení tělesa vymizí. Závislost mezi napětím a pružnou deformací je lineární a lze ji popsat Hookovým zákonem.

$$\sigma = E\varepsilon \quad (19)$$

kde σ je napětí, ε je podélné prodloužení a E konstanta úměrnosti (Youngův modul pružnosti) [1, 5].

3.3 Moduly pružnosti

Moduly pružnosti vyjadřují vnitřní odpor materiálu proti pružné deformaci. Čím větší je modul pružnosti, tím větší je napětí potřebné na vyvolání stanovené deformace. Pro jednoosou napjatost se používá Youngův modul pružnosti v tahu – tlaku (E) a Coulombův modul pružnosti ve smyku (G). Velikost modulu E je určena strmostí energiové křivky na Obr. 3.1 v blízkém okolí rovnovážné polohy.



Obr. 3.1 Energiová křivka [5]

Coulombův modul pak lze určit ze vztahu

$$G = \frac{E}{2(1 + \mu)} \quad (20)$$

kde μ je Poissonův poměr.

Rovněž existuje i modul pro víceosou napjatost, tzv. objemový modul pružnosti K .

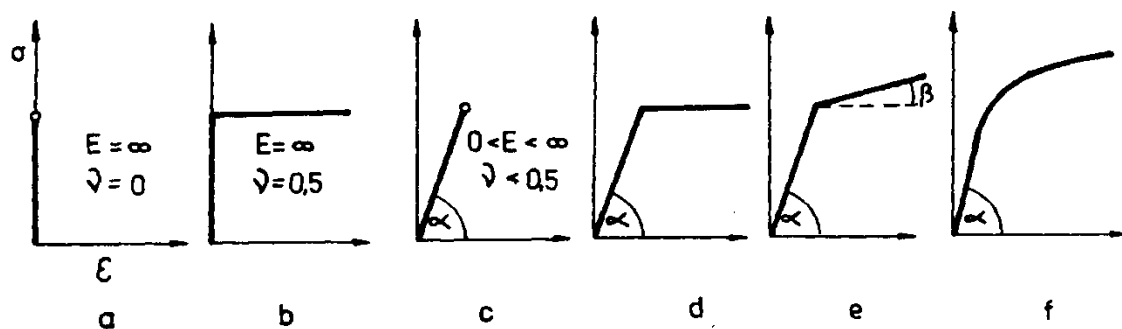
$$K = \frac{-\sigma}{\frac{\Delta V}{V}} = \frac{1}{\kappa} \quad (21)$$

kde κ je objemová stlačitelnost [1, 4, 5].

3.4 Plastičnost

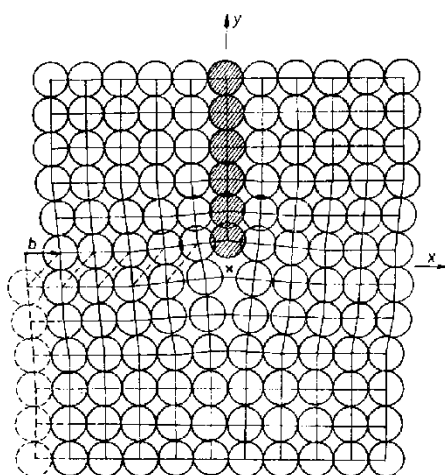
Plastičnost je schopnost materiálu před porušením se trvale deformovat za působení vnějších sil. Plastická deformace nastává po zvýšení napětí nad mez pružnosti respektive nad mez kluzu. Pro většinu kovů je plastičnost typickou vlastností a to i za vyšších teplot.

Plastičnost se obvykle vyjadřuje jako velikost poměrné plastické deformace do porušení.



Obr. 3.2 Tahové diagramy tuhých těles (a až e jsou základní typy idealizovaných diagramů, f je typ reálného tahového diagramu [1])

Plastické deformace se u kovů realizují výhradně smykem ve skluzových rovinách a směrech, například přímočarým posuvem u kovu s kubickou plošně středěnou mřížkou (Al, Cu, Ni, ...), jak je uvedeno na Obr. 3.3.



Obr. 3.3 Model skluzu [4]

V rovnoměrně rozložených atomech je vodorovná skluzová čára uprostřed výšky. Tato čára je řezem skluzové roviny kolmé k nákresně. V této rovině se posouvá horní část krystalu doprava (ve směru osy x). Posuv však není po celé ploše rovnoměrný, jak se původně předpokládalo, nýbrž postupuje celá svislá vrstva (na Obr. 3.3 vyčárkovaná) po druhé vždy o

rozteč. Obrázek ukazuje okamžik, kdy je postupující se vrstva právě ve střední poloze přesunu. Stopa této vrstvy na skluzové rovině, která je ve směru kolmém k nákresně, se nazývá dislokační čára.

Posuv se v prostoru neděje po celé dislokační čáře najednou, ale po vlnách. Kdyby nebylo poruch krystalové mřížky, dislokační čára by se posunula až na konec krystalu a krystalová mřížka by tak zůstala neporušená. Ve skutečnosti dislokační čára narazí na poruchy v krystalové mřížce, čímž se zbrzdí nebo úplně zastaví. Energie vzniklá ubrzděním se z části změní na teplo a z části zůstane v kovu jako volná energie. Dislokace uvedené na Obr. 3.3 jsou dislokace hranové, které se vyznačují tím, že mají přímkovou dislokační čáru a Burgersův vektor má směr postupující dislokace.

Pohyb nemusí postoupit celou šířkou krystalu, nýbrž její částí. Dislokace pak nabírá tvar šroubovice. Tento složitější pohyb vyžaduje menší smykové napětí. Dislokace může též probíhat částečně jako hranová a částečně i jako šroubová nebo i složitějším pohybem.

Kluzové plochy jsou takové, aby vyžadovaly co nejmenší energii, tedy plochy nejhustěji obsazené atomy. Burgersovy vektory musí mít směry takové, aby se v nich atomy dotýkaly [1, 2, 4].

3.4.1 Kritéria plastičnosti

Plastická deformace se vyznačuje tím, že těleso mění své rozměry a tvar.

Plastická deformace je z makroskopického hlediska považována za přemísťování hmoty materiálem, přičemž objem zůstává konstantní.

Míra plastičnosti se při jednoosém tahu za použití válcového zkušebního tělesa vyjádří poměrným prodloužením

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0} = \frac{L - L_0}{L_0} \quad (22)$$

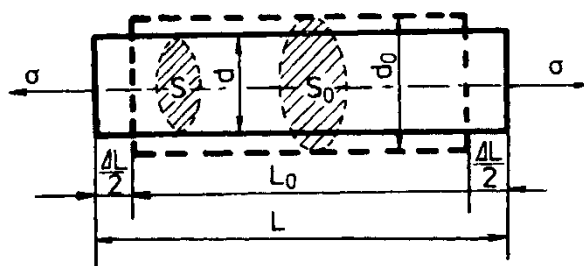
a poměrným zmenšením průřezu

$$\psi = \frac{\Delta S}{S_0} = \frac{S_0 - S}{S_0} \quad (23)$$

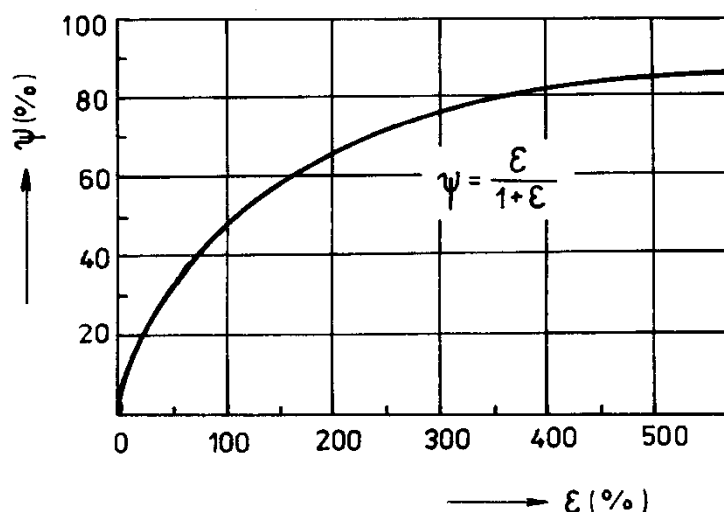
V případě, že je deformace rovnoměrná po délce a objem zůstává konstantní, pak platí

$$\varepsilon = \frac{\psi}{1 - \psi} \quad (24)$$

Rovněž můžeme tento vztah vyjádřit graficky



Obr. 3.4 Prodloužení a zúžení tuhého tělesa při jednoosém tahu [1]



Obr. 3.5 Závislost mezi poměrným zúžením ψ a poměrným prodloužením ε v oblasti rovnoměrné tahové deformace [1]

Uvedené charakteristiky lze též vyjádřit jako skutečné. Skutečnou podélnou deformaci můžeme vyjádřit vztahem

$$\bar{\varepsilon} = \ln(1 + \varepsilon) \quad (25)$$

a skutečnou příčnou deformaci vztahem

$$\bar{\psi} = \int_{S_0}^S \frac{dS}{S} = \ln \frac{S}{S_0} = \ln \left(\frac{S_0 - \Delta S}{S_0} \right) = \ln \left(1 - \frac{\Delta S}{S_0} \right) \quad (26)$$

dosadíme-li vztah (23) do vztahu (26), pak dostaneme

$$\bar{\psi} = \ln(1 - \psi) \quad (27)$$

Vztah mezi skutečnou podélnou deformací a skutečnou příčnou deformací pak můžeme psát jako

$$\bar{\varepsilon} = \ln \left(1 + \frac{\psi}{1 - \psi} \right) = \ln \left(\frac{1}{1 - \psi} \right) = -\bar{\psi} \quad (28)$$

[1].

3.5 Deformační zpevnění

Důvodem toho že zatěžovací křivka v diagramu $\sigma - \varepsilon$ stoupá, je fakt, že se zvyšuje odpor proti plastické deformaci. To zapříčiňuje deformační zpevnění, které je závislé na teplotě a struktuře materiálu. Deformační zpevnění můžeme charakterizovat zejména modulem plastičnosti a exponentem deformačního zpevnění.

Modul plastičnosti lze vyjádřit v určitém bodě tahového diagramu jako poměr mezi napětím a celkovou poměrnou deformací a jeho velikost může nabývat hodnot $0 < D < E$.

$$D_1 = \frac{\sigma_1}{\varepsilon_1} = \tan \vartheta_1 \quad (29)$$

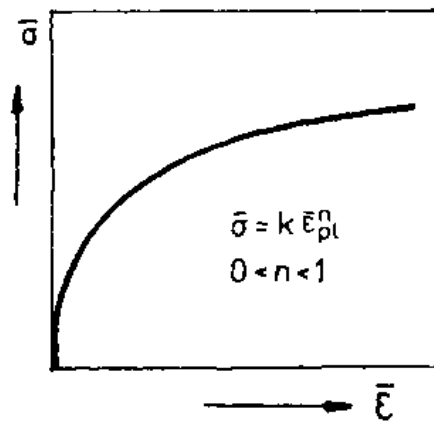
kde D_1 je modul plastičnosti a ϑ_1 je úhel, který mezi sebou svírají spojnice počátku souřadného systému $\sigma - \varepsilon$ s bodem na zatěžovací křivce a osa ε .

Deformační zpevnění lze v oblasti elasticko-plastické deformace charakterizovat závislostí skutečného napětí a skutečné deformace, která byla pro většinu kovů a slitin zjištěná a popsána empirickým vztahem (Holomonův vztah)

$$\bar{\sigma} = k \bar{\varepsilon}_{pl}^n \quad (30)$$

kde $\bar{\varepsilon}_{pl}$ je skutečná plastická deformace, k je materiálová konstanta, n je exponent deformačního zpevnění a $\bar{\sigma}$ je skutečné napětí, které lze vyjádřit vztahem

$$\bar{\sigma} = \frac{F}{S} = \frac{\sigma \cdot S_0}{S} = \frac{\sigma \cdot L}{L_0} = \sigma \left(\frac{L_0 + \Delta L}{L_0} \right) = \sigma(1 + \varepsilon) = \sigma \left(\frac{1}{1 - \psi} \right) \quad (31)$$



Obr. 3.6 Grafické zobrazení závislosti $\bar{\sigma} = k \bar{\varepsilon}_{pl}^n$ [1]

Vztah (30) představuje v logaritmických souřadnicích $\log \sigma - \log \varepsilon$ přímku, kde n je směrnici této přímky a můžeme ji vyjádřit rovnicí

$$\log \bar{\sigma} = \log k + n \times \log \bar{\varepsilon}_{pl} \quad (32)$$

z čehož vyplývá

$$n = \frac{\log \bar{\sigma} - \log k}{\log \bar{\varepsilon}_{pl}} \quad (33)$$

Konstanta $k = \bar{\sigma}$, když $\bar{\varepsilon} = 1$.

Konstanta n může nabývat hodnot $n \in (0; 1)$. Exponent deformačního zpevnění vyjadřuje schopnost materiálu se rovnoměrně plasticky deformovat, tedy platí

$$n \approx \varepsilon_{pr} \quad (34)$$

kde ε_{pr} je deformace do meze pevnosti, tedy deformace rovnoměrná. Čím je exponent deformačního zpevnění větší, tím větší rovnoměrnou deformaci materiál snese, aniž by došlo k vytvoření krčku.

V případě že pro materiál přibližně platí

$$\sigma = k' \times \varepsilon^{n'} \quad (35)$$

pak platí i

$$n' = \varepsilon_r \quad (36)$$

kde ε_r je celková rovnoměrná deformace [1, 5].

3.6 Pevnost

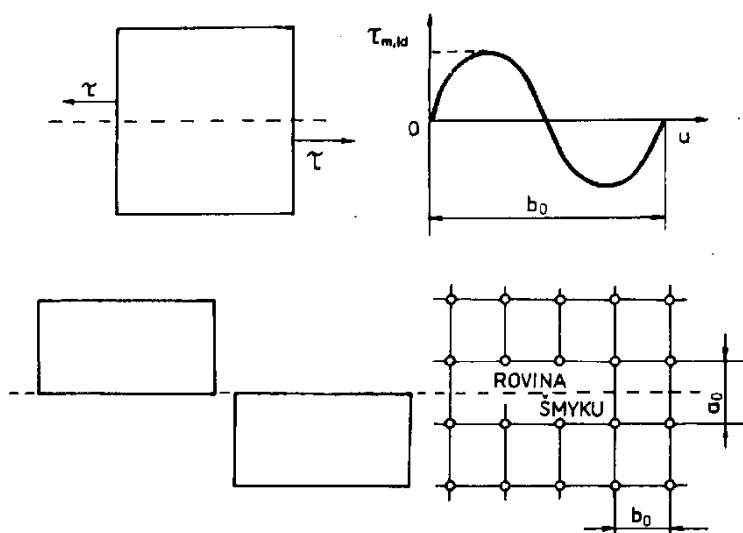
Pevnost můžeme definovat jako odpor materiálu proti trvalému porušení soudržnosti částic. Jedna se tedy o napětí, které materiál rozdělí na dvě a více částí.

Kovy lze takto porušit dvěma základními způsoby a to štěpením nebo smykem.

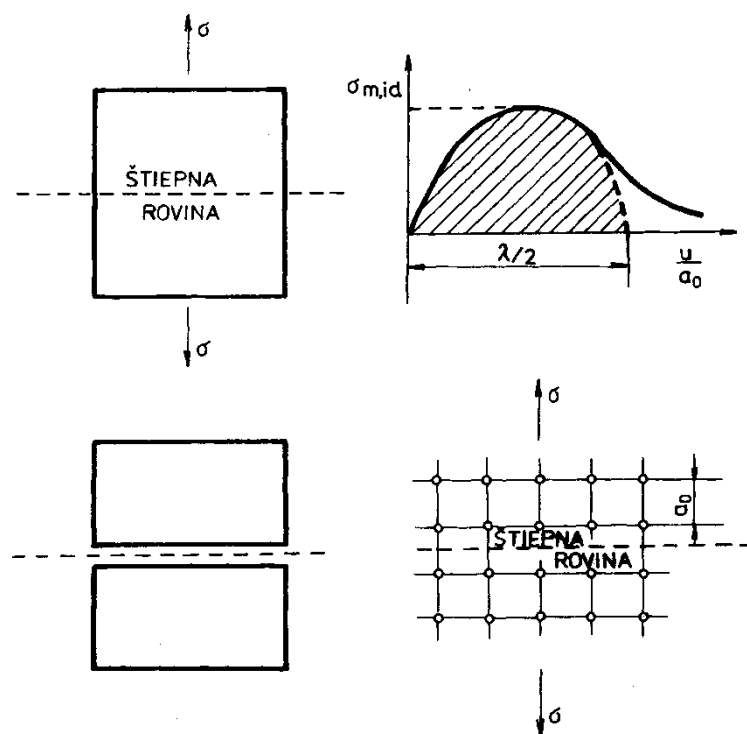
Štěpení neboli dělení je takový způsob porušování, při kterém na materiál (resp. kolmo na rovinu štěpení) působí normálové napětí. Štěpením můžeme porušit materiál například při namáhání tahovým, ohybovým, ale i namáháním krutem.

Naopak smykové porušování, jak již napovídá název, nastává při působení smykové síly ve smykové rovině a lze ho dosáhnout namáháním krutem a stříhem, ale i tahem nebo tlakem.

Pevnost můžeme dělit podle způsobu namáhání na pevnost v tahu, tlaku, ohybu, krutu a stříhu. Není-li uvedeno jinak, bereme primárně pojem pevnost jako pevnost v tahu [1].



Obr. 3.7 Schéma smykového porušení [1]



Obr. 3.8 Schéma štěpného porušení [1]

3.6.1 Konvenční pevnost

Konvenční pevnost je definovaná jako největší konvenční napětí na průřez zkušebního tělesa. Dojde k ní při takovém napětí, při kterém nastane určitý mezní stav. Při tahové zkoušce je konvenční pevnost stav plastické nestability, při níž se začíná tvořit krček a u křehkých materiálů je to okamžik lomu materiálu (nevzniká zde krček, rovnou lom).

$$R_m = \frac{F_{max}}{S_0} \quad (37)$$

kde F_{max} je maximální síla působící na řez a S_0 je řez zkušebního tělesa.

V praxi je konvenční pevnost výhradně používána k hodnocení pevnosti materiálu a symbol R_m vyjadřující velikost této pevnosti má mezinárodní význam [1, 5].

3.6.2 Skutečná pevnost

Skutečná pevnost je definovaná skutečným napětím, které způsobí lom tělesa. Pro tahovou zkoušku, tedy při jednoosém namáhání tahem je skutečná pevnost definovaná vztahem

$$\bar{R}_f = \frac{F_f}{S_u} \quad (38)$$

kde F_f je zatěžující síla v okamžiku lomu a S_u je skutečný řez v okamžiku lomu.

Skutečná pevnost je zpravidla vyšší než konvenční pevnost, avšak výjimkou jsou křehké materiály, u nichž se materiál poruší už na mezi kluzu, tedy platí $\bar{R}_f \cong R_m$ [1, 5].

3.6.3 Ideální pevnost

Ideální pevnost je taková hodnota pevnosti, kterou můžeme pro určitý materiál dosáhnout při určitém zatěžování.

Kovy bez mřížkových poruch dosahují pevnosti, která se ideální pevnosti blíží, ne-li jí dosahuje. Největší ideální pevnosti dosahují materiály s vysokým modulem pružnosti, velkou hodnotou povrchové energie a malými atomy, které mají mezi sebou silné vazby [1].

3.7 Houževnatost

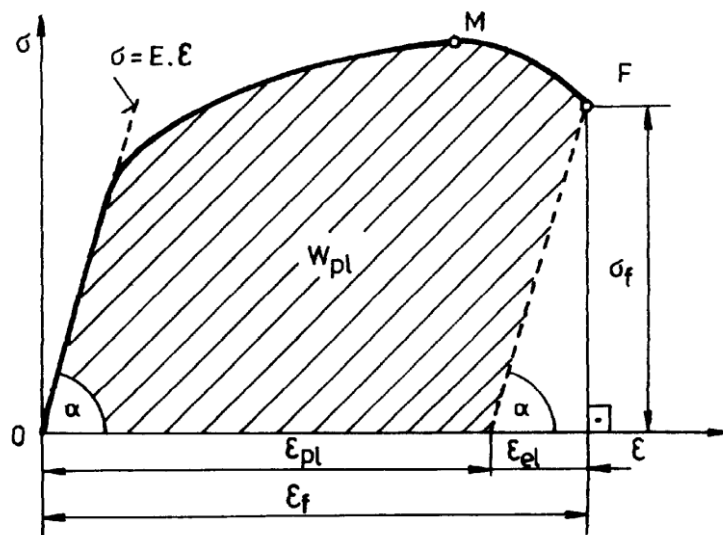
Houževnatost je definována jako práce potřebná k trvalé (plastické) deformaci nebo též k rozdělení materiálu na dvě části. Tato práce je většinou prací přetvárnou, neboť před rozdělením materiálu musí předcházet určité přetvoření. Protikladem houževnatosti je křehkost, kovy jsou však většinou houževnaté. Křehké kovy se před porušením deformují jen nepatrně. Houževnatost má význam především v oblasti namáhání konstrukčních materiálů, ale i v technologii zpracování kovů.

Energii plastické deformace při jednoosém tahu lze pro válcové těleso vyjádřit vztahem

$$W_{pl} = \int_{L_0}^{L_0 + \Delta L} F \times dL - \frac{1}{2} \times F_{\Delta L} \times \Delta L_{el} \quad (39)$$

kde $\Delta L = L - L_0$ je celkové prodloužení, $F_{\Delta L}$ je síla odpovídající prodloužení ΔL a ΔL_{el} je celkové pružné prodloužení.

Tento vztah vyjadřuje, jakou musíme vynaložit práci, abychom dosáhli plastické deformace tělesa [1, 4, 5].



Obr. 3.9 Grafické znázornění houževnatosti do porušení kovu při jednoosém tahu [1]

4 Zkouška tahem

Zkouška jednoosým tahem je základní mechanická zkouška, která se díky svému principu, jednoduchosti a účelnosti stala nejrozšířenější i nejuznávanější zkušební metodou neboť na základě této zkoušky určujeme a hodnotíme napět'ové a deformační charakteristiky zkoušeného materiálu, především mez kluzu R_{eH} , R_{eL} , $R_{p0,2}$, mez pevnosti R_m , tažnost A a kontrakci Z . Dále lze stanovit modul pružnosti E , mez pružnosti R_{px} , exponent n a koeficient k deformačního zpevnění atd.

Principem zkoušky je deformace a následné přetržení zkušební tyče namáhané jednoosým tahem. Zkouška se obvykle provádí za normálních teplot okolního prostředí, tedy od 10°C do 35°C, ale lze ji (pokud je to předepsáno) provádět i za snížených či zvýšených teplot. Tento faktor však zvyšuje náročnost a náklady zkoušky. Optimální rychlosti zatěžování se pohybují v závislosti od zkoušeného materiálu v rozmezí od 0,5 do 2 mm.min⁻¹ [1, 5, 8].

4.1 Zkušební tyče

Na zkoušku tahem, a stejně tak na zkoušku krutem, se používají hladké zkušební tyče kruhového průřezu, většinou připravené obráběním vzorku. Některé vzorky, jako jsou například dráty, tyče a různé profily, mohou být zkoušeny bez předchozího obrobení. Zkušební tyč se skládá ze dvou upínacích hlav a ze zkoušené části, která je tvořena válcem o konstantním průměru d_0 a délce l_0 . Při zkoušce se sleduje a vyhodnocuje pouze tato pracovní část zkušební tyče [1, 8].

4.1.1 Rozdělení zkušebních tyčí

Zkušební tyče můžeme dělit podle tvaru průřezu na kruhové, ploché a ostatní nebo podle poměru $(L_0/S_0)^{1/2}$ na dlouhé a krátké.

Dalším rozdělením zkušebních tyčí je na nepoměrné, kde počáteční délka L_0 není závislá na počátečním příčném průřezu S_0 , a na poměrné. Podle poměru $(L_0/S_0)^{1/2}$ můžeme poměrné zkušební tyče dělit na dlouhé a krátké. Jestliže je poměr $(L_0/S_0)^{1/2}$ roven 5,65, můžeme mluvit o krátkých zkušebních tyčích a pokud je tento poměr roven 11,3 můžeme mluvit o dlouhých zkušebních tyčích. Aby po zkoušce bylo možné zjistit, na jaké zkušební tyči byla zkouška provedena, označujeme tažnosti A_{10} jako tažnost dlouhé zkušební tyče, a A_5 jako tažnost krátké zkušební tyče [1, 8].

4.2 Zkušební podmínky

Podmínky provádění zkoušky mají někdy značný vliv na nerovnoměrnost napětí ve zkušební tyči. Tento vliv je především důležitý u ocelí, které mají oblast nestability při mezi kluzu. Oblast nestability je především ovlivněna zkušebními podmínkami, které nijak nesouvisí s vlastnostmi kovů. Mezi tyto faktory patří především velikost a tvar zkušební tyče (viz. výše), způsob upnutí tyče a rychlost zatěžování. Nemalý vliv na výsledky tahové zkoušky má i jemnost krystalizace a neutronové ozařování [4].

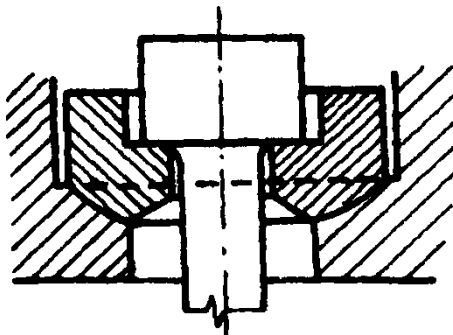
4.2.1 Způsob upnutí tyče

Dokonalé upnutí zkušební tyče je základním předpokladem jak dosáhnou přesné výsledky zkoušky. Nepřesným upnutím zkušební tyče vznikají přídavná namáhání ohybem, která se

projevují hlavně na začátku zkoušky. Přesné upnutí má především vliv na vyhodnocení meze a modulu pružnosti, ale i na mez kluzu. Nepřesným upnutím zkušební tyče bychom dostali zkreslené výsledky zkoušky a zkouška by pak byla zbytečná.

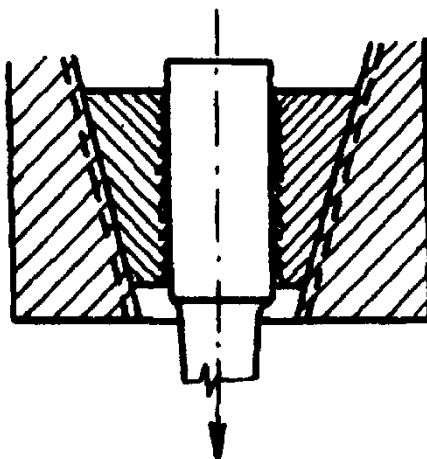
Rozlišujeme tři základní úpravy hlav zkušebních tyčí, což jsou zkušební tyče s osazenými hlavami, s hladkými válcovými hlavami a se závitovými hlavami.

Zkušební tyče s osazenými hlavami jsou zachycené plochou mezikruží upínací hlavy. Ta potom sedí ve dvoudílném kroužku, který je vložený v kulovitém sedle upínací vložky trhačího stroje. Tento způsob upnutí není vhodný pro křehké materiály, které by se mohli porušit v místě změny průřezu. Při tomto způsobu je ale dosažena velká přesnost tahové zkoušky.



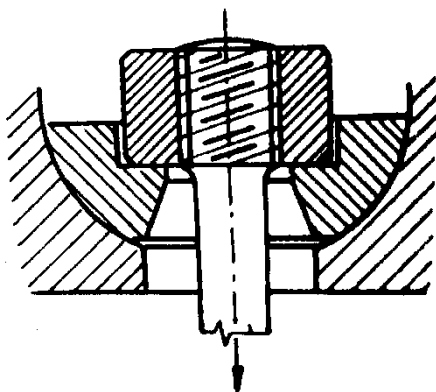
Obr. 4.1 Způsob upnutí zkušební tyče do dvoudílných kroužků [1]

Zkušební tyče s hladkými válcovými hlavami se upínají do klínových čelistí. Tento způsob upnutí je velice rychlý, avšak při zkoušení tvrdých materiálů upínací hlavy prokluzují nebo vznikají otřesy.



Obr. 4.2 Způsob upnutí zkušební tyče do klínových čelistí [1]

Zkušební tyče se závitovými hlavami se zašroubovávají do kroužků, které jsou uloženy na kulovitých podložkách. Tento způsob upnutí je nejpreciznější a nejdokonalejší, avšak více nákladný na přípravu zkušebních vzorků [1, 4].



Obr. 4.3 Způsob upnutí zkušební tyče se závitovými hlavami [1]

4.2.2 Rychlost zatěžování

Konstrukce trhacích strojů bývá navržena tak, že čelist spojená s měřicím zařízením je statická a druhá čelist se pohybuje konstantní rychlostí nezávislou na napětí. Rychlost zatěžování volíme podle typu zkušebního tělesa. Velikost rychlosti zatěžování se při zkoušce projevuje až v plastické oblasti deformace, kde se zvyšující se rychlosti deformace narůstá mez pevnosti v tahu. Nesmíme však opomenout fakt, že při zkoušce se deformuje celý zkoušený objem tyče, tedy rychlost zatěžování závisí na rozměrech zkušební tyče.

Rychlost zatěžování můžeme měřit dvěma základními způsoby. Prvním způsobem je měření střední rychlosti prodlužování měřené délky a druhým způsobem je měření střední rychlosti růstu zatížení, tedy růstu napětí ve zkoušeném průřezu. V minulosti bylo nejjednodušší měřit rychlost zatěžování pomocí stopek. Dnešní stroje mají již zařízení ukazující rychlost zatěžování [4, 9].

4.2.3 Jemnost krystalizace

Jemnost krystalizace má na výsledky tahové zkoušky zásadní vliv. Čím hrubozrnnější materiál, tím jsou nižší pevnostní hodnoty. Největší vliv má velikost zrna na mez pružnosti a kluzu. Pevnostní hodnoty při zvětšování velikosti zrn v materiálu neklesají až do nuly, ale na úroveň monokrystalu. Jemnozrnná struktura je například důsledkem tváření za studena, čímž dostaneme větší mez kluzu, ale na úkor zmenšení tažnosti a kontrakce [4].

4.2.4 Neutronové ozařování

Ozařování materiálu neutrony má nepříznivý vliv na jeho vlastnosti. Ozařováním se zvyšuje mez kluzu a zmenšuje se tažnost a kontrakce, tedy podobně jako při tváření za studena. Účinek radiace je závislý na její celkové dávce, nikoliv však na způsobu jakým ozařujeme. Zjišťování houževnatosti po ozaření je tedy důležitou zkouškou materiálu, používaných na jaderné reaktory [4].

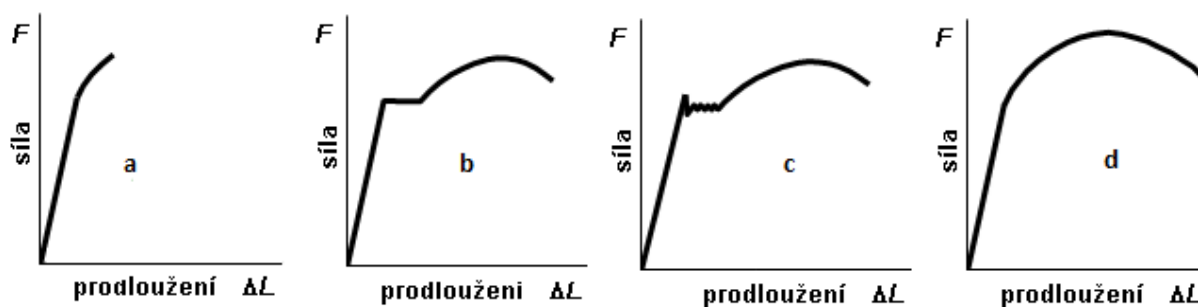
4.3 Provedení zkoušky

Zkušební tyč musí být vhodným způsobem upevněna do trhacího stroje. V nejlepším případě tak, aby zatížení působilo přesně v ose zkušební tyče. Po vhodném upevnění může být stroj spuštěn a tyč je tak zatěžována silou F , jejíž velikost je zaznamenávána v závislosti na prodloužení ΔL , způsobené tímto zatížením. Zkouška tahem obvykle končí lomem zkušební tyče.

Výsledky tahové zkoušky jsou zaznamenávány do tahového diagramu. Tahový diagram může být zaznamenán v různých hodnotách:

- v absolutních hodnotách $F - \Delta L$
- v poměrných hodnotách konvenčních veličin $\sigma - \varepsilon$
- v poměrných hodnotách skutečných veličin $\bar{\sigma} - \bar{\varepsilon}$
- v poměrných hodnotách skutečných veličin $\bar{\sigma} - \bar{\psi}$

Nejvíce se však používá diagram zaznamenaný v poměrných hodnotách konvenčních veličin. Tento diagram je však totožný s diagramem zaznamenaným v absolutních hodnotách. Na Obr. 4.4 jsou zaznamenány základní typy tohoto diagramu pro kovové materiály [1], [8].



Obr. 4.4 Základní typy tahového diagramu (a – diagram křehkého materiálu, b – diagram materiálu s výraznou mezí kluzu, c – diagram materiálu s horní a dolní mezí kluzu, d – diagram materiálu se smluvní mezí kluzu) [8]

4.3.1 Lom při tahové zkoušce

Analýzou lomové plochy (fraktografií) doplňujeme údaje o mechanických charakteristikách materiálu. Zjistíme tak informace o strukturních a metalurgických faktorech, které ovlivňují lomový proces.

V kovových materiálech mohou nastat v důsledku tahové zkoušky čtyři základní typy lomů: tvárný, křehký, smykový a bodový.

U bodového lomu dosahuje kontrakce téměř hodnoty $Z = 100\%$ a lomová plocha je bodová (kruhový průřez) nebo přímková (čtyřhranný průřez). Lomová síla je téměř nulová. Tento typ lomu nastává u kovů velmi čistých a vysoce plastických. Většinou bývá i podmínkou vysoká zkušební teplota, při které téměř nedochází k deformačnímu zpevnění.

Smykový lom vzniká zpravidla v rovinách největšího smykového napětí, což jsou plochy, které svírají se směrem zatížení úhel 45° . Tento typ lomu není příliš častý.

Křehký lom vzniká odtržením v rovině maximálního normálového napětí. Lomová plocha je u křehkého lomu rovinná a zpravidla bývá lesklá a zrnitá na pohled. Zrnitý vzhled je důsledkem štěpného mechanismu porušení při minimální plastické deformaci. V mnoha případech vzniká porušení v místech oslabených hranic zrn, což je v odborné literatuře nazýváno jako interkrystalický křehký lom. Obecně vzniká křehký lom v křehkých materiálech, jako je například zakalená ocel, šedá litina nebo vysoce pevné slitiny hliníku a titanu.

Tvárný lom je charakteristickým typem lomové plochy pro většinu tvárných a houževnatých polykrystalických materiálů. Je způsoben nukleací, růstem a spojováním mikroductin, které vznikají na částicích sekundární fáze, jako jsou vměstky a precipitáty [5].

4.4 Napěťové charakteristiky

U zkoušky jednoosým tahem obvykle určujeme modul pružnosti v tahu E , mez úměrnosti R_U , mez kluzu R_{eH} , R_{eL} , R_p , a pevnost v tahu R_m [1, 5].

4.4.1 Modul pružnosti

Modul pružnosti můžeme obecně charakterizovat jako odolnost materiálu vůči elastické deformaci, tedy tuhost vazeb mezi atomy. Zjišťuje se z lineární části tahového diagramu a závisí na atomovém objemu. Se zmenšujícím se poloměrem atomu narůstá měrná váha a modul pružnosti. Modul pružnosti můžeme vyjádřit vztahem

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad (40)$$

[1, 4, 8].

4.4.2 Mez pružnosti

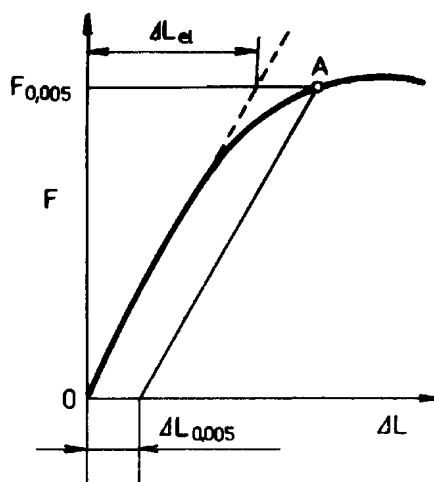
Mez pružnosti je definována jako napětí, které způsobí trvalou deformaci o velikosti $5 \cdot 10^{-3}\% L_0$ a určuje se z přesného tahového diagramu $F - \Delta L$, který se získá měřením pomocí přesného průtahoměru.

Hodnota síly na mezi pružnosti $F_{0,005}$ se zjistí grafickou interpolací zatěžovací křivky $F - \Delta L$ (Obr. 4.5). Na deformační osu se v příslušném měřítku nanese úsečka zodpovídající hodnotě ΔL při trvalé deformaci $5 \cdot 10^{-3}\% L_0$ a v této vzdálenosti se vede rovnoběžka s přímočarým úsekem zatěžovacího diagramu. Tím se eliminuje pružná deformace ΔL_{el} . Souřadnice bodu A, ve kterém rovnoběžka protne křivku O-A, udává sílu $F_{0,005}$.

Mez pružnosti můžeme definovat vztahem

$$R_{0,005} = \frac{F_{0,005}}{S_0} \quad (41)$$

kde $F_{0,005}$ je síla, která způsobí trvalou deformaci $5 \cdot 10^{-3}\% L_0$ [1].



Obr. 4.5 Způsob stanovení smluvní meze pružnosti [1]

4.4.3 Mez úměrnosti

Mez úměrnosti je definována jako největší napětí, při kterém ještě platí Hookův zákon. V podstatě je to tedy napětí, při kterém nastává první odklon od lineárního průběhu. Takto definovaná mez úměrnosti může být považována za totožnou s mezí pružnosti a můžeme ji

tedy podobně jako mez pružnosti zjistit jen přibližně. Mez úměrnosti můžeme vyjádřit vztahem

$$R_U = \frac{F_U}{S_0} = R_{0,005} = \frac{F_{0,005}}{S_0} \quad (42)$$

kde F_U je síla, která způsobí první odklon od lineárního průběhu tahového diagramu [1].

4.4.4 Mez kluzu

Mez kluzu charakterizuje přechod mezi elastickou a elasticko-plastickou deformací. Jedná se tedy o napětí, při kterém se začíná zkoušený materiál plasticky deformovat. Charakter přechodu mezi elastickou a plastickou deformací závisí na typu materiálu. V tahovém diagramu se může mez kluzu projevit dvěma formami, kterými jsou výrazná mez kluzu a nevýrazná mez kluzu.

U slitin některých kovů s malým množstvím přísad vzniká výrazná mez kluzu, která se projevuje diskontinuálním průběhem (viz. Obr. 4.6) a kterou můžeme popsat horní a dolní mezí kluzu.

Horní mez kluzu R_{eH} je definovaná jako maximální hodnota napětí, která předchází prvnímu poklesu zatížení a lze ji určit z tahového diagramu (závislosti napětí na prodloužení) měřeného průtahoměrem nebo pomocí indikátoru špičkového zatížení.

Dolní mez kluzu R_{eL} je definována jako nejnižší hodnota napětí při plastickém kluzu, bez uvážení počátečních přechodových jevů. R_{eL} se rovněž určuje ze závislosti napětí na prodloužení měřené průtahoměrem.

U nízkouhlíkových ocelí a některých slitin Al, Cu a jiných kovů, obsahujících malé množství přísad, vzniká výrazná mez kluzu, která se projevuje průběhem znázorněným na Obr. 4.6.

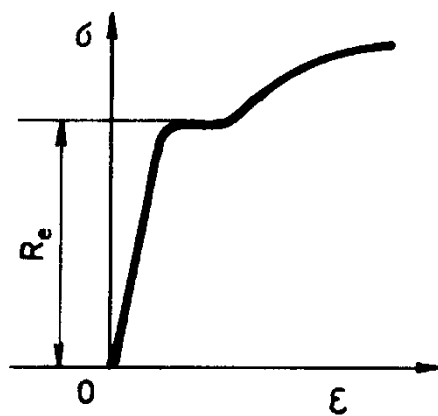
Výrazná mez kluzu R_e je definována jako napětí, při kterém se zkušební tyč trvale deformuje bez výrazného zvětšení tahového zatížení a lze ji určit z tahového diagramu.

Nevýrazná nebo těž plynulá mez kluzu je charakterizovaná plynulým přechodem z elastické do elasticko-plastické oblasti deformace. Na tahovém diagramu znázorněném na Obr. 4.8 se neobjevuje žádná diskontinuita, a proto se mez kluzu musí vyjádřit smluvně.

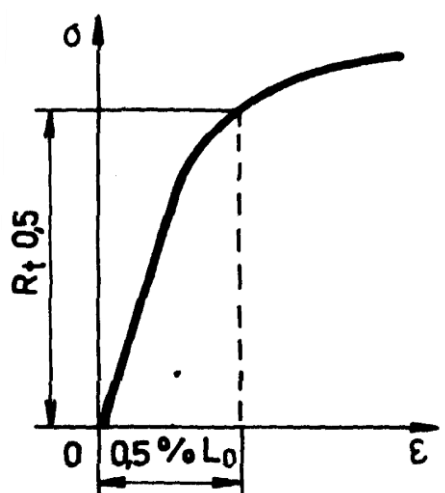
Smluvní mez kluzu se dá vyjádřit za pomoci plastického prodloužení (R_p) nebo celkového prodloužení (R_t) určeného průtahoměrem.

R_p určuje ze závislosti napětí-deformace přepočítané ze závislosti zatížení-prodloužení měřené průtahoměrem vynesení rovnoběžky s přímkovou částí závislosti ve vzdálenosti odpovídající předepsanému plastickému prodloužení v procentech měřenému průtahoměrem, např. $0,2 \% L_0 \rightarrow \varepsilon = 0,002$. Bod, ve kterém tato rovnoběžka protíná závislost tahového diagramu, udává zatížení odpovídající požadované smluvní mezi kluzu při plastickém prodloužení měřeném průtahoměrem.

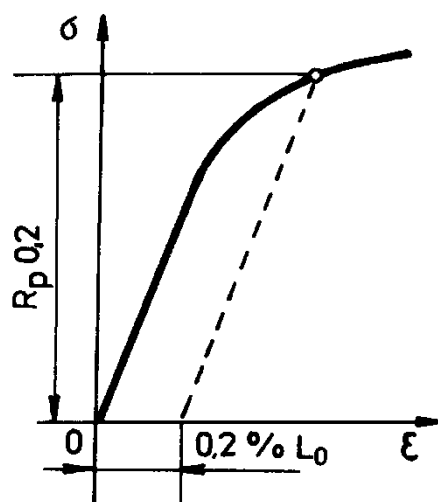
R_t se určuje ze závislosti napětí-deformace přepočítané ze závislosti zatížení-prodloužení měřené průtahoměrem vynesení rovnoběžky s osou zatížení v předepsané vzdálenosti procentu celkového prodloužení měřeného průtahoměrem např. $0,5\% L_0 \rightarrow \varepsilon = 0,005$. Bod, ve kterém tato rovnoběžka protne křivku závislosti napětí-deformace, určuje napětí odpovídající smluvní mezi kluzu (viz. Obr. 4.7) [1, 8, 10].



Obr. 4.6 Výrazná mez kluzu R_e [1]



Obr. 4.7 Smluvní mez kluzu určená z celkové deformace při zatížení [1]



Obr. 4.8 Smluvní mez kluzu určena z trvalé deformace pod zatížením [1]

4.4.5 Mez pevnosti

Mez pevnosti se definuje jako napětí odpovídající největšímu zatížení F_m , které předchází porušení zkušební tyče a určuje se z tahového diagramu. Pevnost v tahu se dá vyjádřit vztahem

$$R_m = \frac{F_m}{S_0} \quad (43)$$

kde F_m je maximální síla v tahovém diagramu a S_0 je původní plocha průřezu zkušební tyče. Mez pevnosti je důležitou materiálovou charakteristikou, podle níž se klasifikují materiály. Je ovlivněna chemickým složením, typem struktury kovu a vnitřními procesy, které v materiálu probíhají při plastické deformaci např. deformační zpevňování a dynamické deformační stárnutí [1, 8].

4.5 Deformační charakteristiky

Deformační charakteristiky nám určují tvárnost materiálu. Abychom však tvárnost mohli určit, musíme určit jak tažnost, tak i kontrakci. Podíl těchto dvou deformačních charakteristik Z/A nám rovněž určuje sklon k lokalizaci plastické deformace (ostrota krčku), což je nežádoucím jevem konstrukčních materiálů [5].

4.5.1 Tažnost

Tažnost je definována jako poměrné podélné trvalé prodloužení zkušební tyče po přetržení vyjádřené v procentech počáteční měřené délky. Tažnost může být určena přímým zjištěním konečné měřené délky L_u po přetržení zkušební tyče a výpočtem

$$A = \frac{L_u - L_0}{L_0} \cdot 100 = \frac{\Delta L}{L_0} \cdot 100 \quad [\%] \quad (44)$$

V případě, že k měření tažnosti byla použita poměrná zkušební tyč, která má počáteční měřenou délku jinou než $L_0 = 5,65 \cdot \sqrt{S_0}$, kde S_0 je počáteční plocha měřeného průřezu, pak musí být symbol A doplněn o index, který označuje součinitel použité poměrnosti zkušební tyče. V případě použití nepoměrné zkušební tyče, musí být symbol A doplněn o index označující počáteční měřenou délku zkušební tyče v mm [1, 8, 10].

4.5.2 Kontrakce

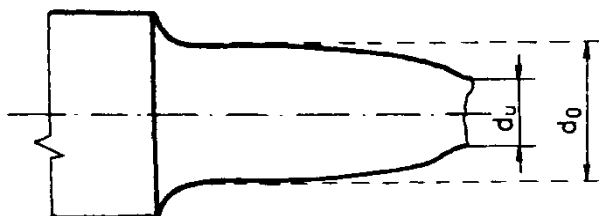
Kontrakce je definována jako největší poměrné trvalé zúžení průřezu zkušební tyče, které se odměřuje v místě lomu po přetržení. Lze ji vyjádřit vztahem

$$Z = \frac{S_0 - S_u}{S_0} \cdot 100 = \frac{\Delta S}{S_0} \cdot 100 = \psi_u \cdot 100 \quad [\%] \quad (45)$$

kde $S_0 = \pi \cdot d_0^2 / 4$ je plocha původního průřezu zkušební tyče v mm^2 , $S_u = \pi \cdot d_u^2 / 4$ je plocha nejmenšího průřezu zkušební tyče po přetržení v místě lomu v mm^2 a ψ_u je poměrná trvalá deformace.

Zúžený průřez S_u se u tyčí kruhového průřezu zjišťuje měřením d_u zúžené části tyče (v místě krčku) a to ve dvou navzájem kolmých směrech. V případě potřeby se musí přetržené části zkušební tyče k sobě přiložit tak, aby osy těchto dvou částí ležely v jedné přímce.

$$Z = 1 - \frac{S_u}{S_0} = \left[1 - \left(\frac{d_u}{d_0} \right)^2 \right] \cdot 100 \text{ [%]} \quad (46)$$

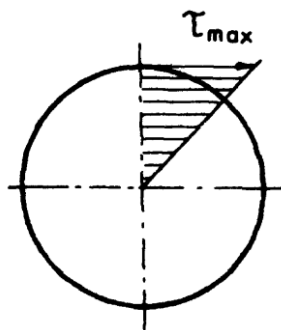


Obr. 4.9 Měření zúžení průřezu S_0 po přetržení zkušební tyče s kruhovým průřezem [1]

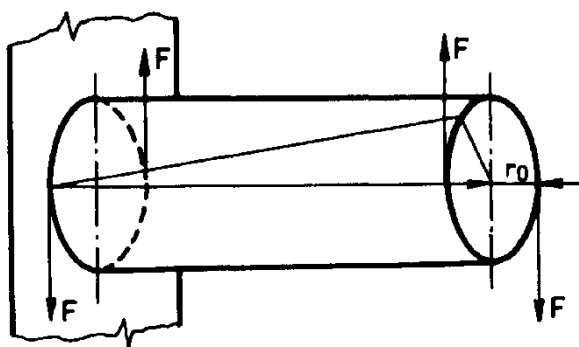
Kontrakce nezávisí na geometrii vzorku a zároveň platí, že čím větší je pevnost, tím menší je kontrakce a se zvyšujícím se obsahem nečistot a příměsí v materiálu se velikost kontrakce rovněž snižuje [1, 5, 10].

5 Zkouška krutem

Namáhání krutem vzniká tehdy, působí-li na tyč dvojice sil, jejichž moment má směr rovnoběžný s osou tyče. Příčný průřez této tyče je pak namáhaný smykovým napětím τ , které se po průřezu tyče mění lineárně. V ose tyče je smykové napětí nulové a jeho maximální hodnota τ_{max} je na povrchu (viz. Obr. 5.2).



Obr. 5.2 Rozložení smykového napětí v průřezu při namáhání krutem [1]



Obr. 5.1 Schéma namáhání válcovitého tělesa krutem [1]

Největší napětí v povrchových částech tyče je potom dáno vztahem

$$\tau_{max} = \frac{M_k}{W_k} \quad (47)$$

kde M_k je krouticí moment a W_k je modul průřezu v krutu, pro který platí vztah

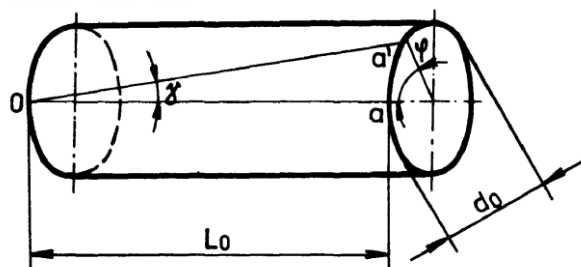
$$W_k = \frac{J_p}{\rho} \quad (48)$$

kde J_p je polární kvadratický moment a ρ je vzdálenost krajního vlákna. Pro kruhový průřez potom dostaneme vztah

$$W_k = \frac{J_p}{R} = \frac{\frac{\pi R^4}{2}}{R} = \frac{\pi R^3}{2} \quad (49)$$

Z geometrie na Obr. 5.3 vyplývá, že pootočením dvou navzájem rovnoběžných kruhových průřezů o průměru d_0 ve vzdálenosti L_0 o úhel φ se přímka Oa posune do Oa' a změni se na šroubovici. Pro malé deformace pak platí

$$\gamma = \frac{\varphi \cdot d_0}{L_0} \quad (50)$$



Obr. 5.3 Geometrické údaje při namáhání tělesa krutem [1]

[1, 5, 6, 11].

5.1 Mechanické charakteristiky

Zkouška jednoosým krutem spočívá v kroucení zkušební tělesa kolem jeho vlastní osy v jednom směru a jejím cílem je zjištění pevnosti v krutu τ_m a zkosu γ u materiálů, ze kterých se vyrábí hřídele nebo torzní tyče. Zkušební stroj nesmí omezovat změnu délky mezi čelistmi vyvolanou kontrakcí a musí i zároveň působit na zkušební tyč tahovým napětím, čímž se zachová rovná osa tyče. Zkouška probíhá tak, že jedna z čelistí se otáčí kolem osy zkušební tělesa, zatímco druhá se úhlově nevychyluje. Zkušební těleso musí být po celé své délce rovné.

Diagram zkoušky krutem udává závislost krouťicího momentu na úhlu zkroucení a pro tvárné materiály má podobný tvar jako tahový diagram (viz. Obr. 5.4), avšak tyto materiály se při namáhání krutem poruší až po několika otáčkách zkušební tyče kolem své osy, a proto se na krut nezkouší. Z diagramu lze určit mez úměrnosti v krutu, danou vztahem

$$\tau_u = \frac{M_u}{W_k} \quad (51)$$

mez pružnosti v krutu danou vztahem

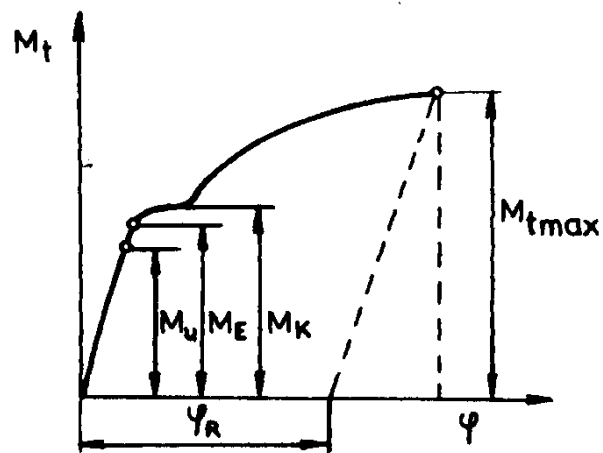
$$\tau_E(x) = \frac{M_E}{W_k} \quad (52)$$

mez kluzu v krutu danou vztahem

$$\tau_K = \frac{M_K}{W_k} \quad (53)$$

a mez pevnosti v krutu danou vztahem

$$\tau_m = \frac{M_{k \max}}{W_k} \quad (54)$$



Obr. 5.4 Diagram zkoušky krutem [1]

Dále lze při zkoušce krutem určit modul pružnosti ve smyku G

$$G = \frac{\tau}{\gamma} = \frac{2 \cdot L_0 \cdot \tau}{\varphi \cdot d_0} \quad (55)$$

[1, 5].

6 Statistické zpracování

6.1 Nejistoty měření

Nejistotu měření u zkoušky tahem nelze stanovit absolutně, protože je tato zkouška ovlivněna jak materiálově nezávislými příspěvkem, tak i materiálově závislými příspěvkem. Podle normy ČSN ISO 6892-1a^[10] měření nejistot zde prezentované nepopisuje rozptyl plynoucí z nehomogenity materiálu, ale bere v úvahu homogenní materiál, jehož nejistota měření spočívá v rozptylu výsledků získaných jednotlivými zkouškami.

Nejistotu měření u můžeme odhadnout opakovaným měřením.

$$u = \frac{s}{\sqrt{n}} \quad (56)$$

kde s je směrodatná odchylka měření a n je počet pozorování [10].

Směrodatnou odchylku spočítáme podle vztahu

$$s = \sqrt{s^2} \quad (57)$$

kde s^2 je rozptyl, který spočteme podle vztahu

$$s^2 = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 = \left(\frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n x_i^2 \right) - \bar{x}^2 \quad (58)$$

kde x_i je údaj o daném pozorování a \bar{x} je aritmetický průměr, který vyjádříme podle vztahu

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n x_i \quad (59)$$

[12].

6.2 Test hypotézy

Testy hypotéz o parametrech normálního rozdělení se velmi často používají při statistickém zpracování dat naměřených materiálových charakteristik. Postup, kterým ověřujeme danou hypotézu, se nazývá test statistické hypotézy a vůči ní stavíme alternativní hypotézu. Pokud je testovaná hypotéza $H: \mu_0 = 0$, tedy že rozdíl středních hodnot je nulový, pak je alternativní hypotéza $\bar{H}: \mu_0 \neq 0$. To znamená, že rozdíl středních hodnot je nenulový.

V našem případě budeme testovat hypotézu, že rozdílné metody určování mechanických charakteristik nemají vliv na jejich určenou střední hodnotu. K tomu nám poslouží Studentův test, kde pozorovaná hodnota testovaného kritéria je

$$t = \frac{\bar{x} - \bar{y} - \mu_0}{\sqrt{\frac{s^2(x)}{n_1-1} + \frac{s^2(y)}{n_2-1}}} \quad (60)$$

kde μ_0 je rozdíl středních hodnot a

$$\bar{W}_\alpha = \langle -\bar{t}_{1-\alpha/2}; \bar{t}_{1-\alpha/2} \rangle \quad (61)$$

kde \bar{W}_α je kritický obor a $\bar{t}_{1-\alpha/2}$ je kvantil Studentova rozdělení

$$\bar{t}_{1-\alpha/2} = \frac{\frac{s^2(x)}{n_1-1} \cdot t(x) + \frac{s^2(y)}{n_2-1} \cdot t(y)}{\frac{s^2(x)}{n_1-1} + \frac{s^2(y)}{n_2-1}} \quad (62)$$

kde $t(x)$, resp. $t(y)$ je $\left(1 - \frac{\alpha}{2}\right)$, což představuje kvantil Studentova rozdělení. Ten najdeme ve statistických tabulkách pro $k = n_1 - 1$, resp. $k = n_2 - 1$ stupňů volnosti. Pokud vypočítaná hodnota $t \in \bar{W}_\alpha = \langle -\bar{t}_{1-\alpha/2}; \bar{t}_{1-\alpha/2} \rangle$, pak hypotézu na hladině významnosti α nezamítáme. Jestliže $t \notin \bar{W}_\alpha = \langle -\bar{t}_{1-\alpha/2}; \bar{t}_{1-\alpha/2} \rangle$, tak hypotézu při této hladině významnosti zamítáme [12].

7 Charakteristiky tahové zkoušky

Zkouška jednoosým tahem byla provedena za pokojové teploty za pomoci axiálně-krutového servo-elektrického testovacího systému od společnosti BiSS (Obr. 7.1). Tento stroj je zejména vhodný pro zkoušku jednoosým tahem, ale i pro zkoušku krutem nebo pro zkoušky nízkocyklové a vysokocyklové únavy. Stroj zvládne zatěžovat axiální silou až 50kN nebo kroutícím momentem 2 kN·m [13].

Cílem této zkoušky bylo roztržení zkušební vzorku a zjištění deformačních charakteristik zkoušeného materiálu, zejména mez kluzu $R_{p0,2}$, mez pevnosti R_m , tažnost A a kontrakci Z . Dále lze ze zkoušky stanovit modul pružnosti E , mez úměrnosti R_U , exponent a koeficient deformačního zpevnění n a k .

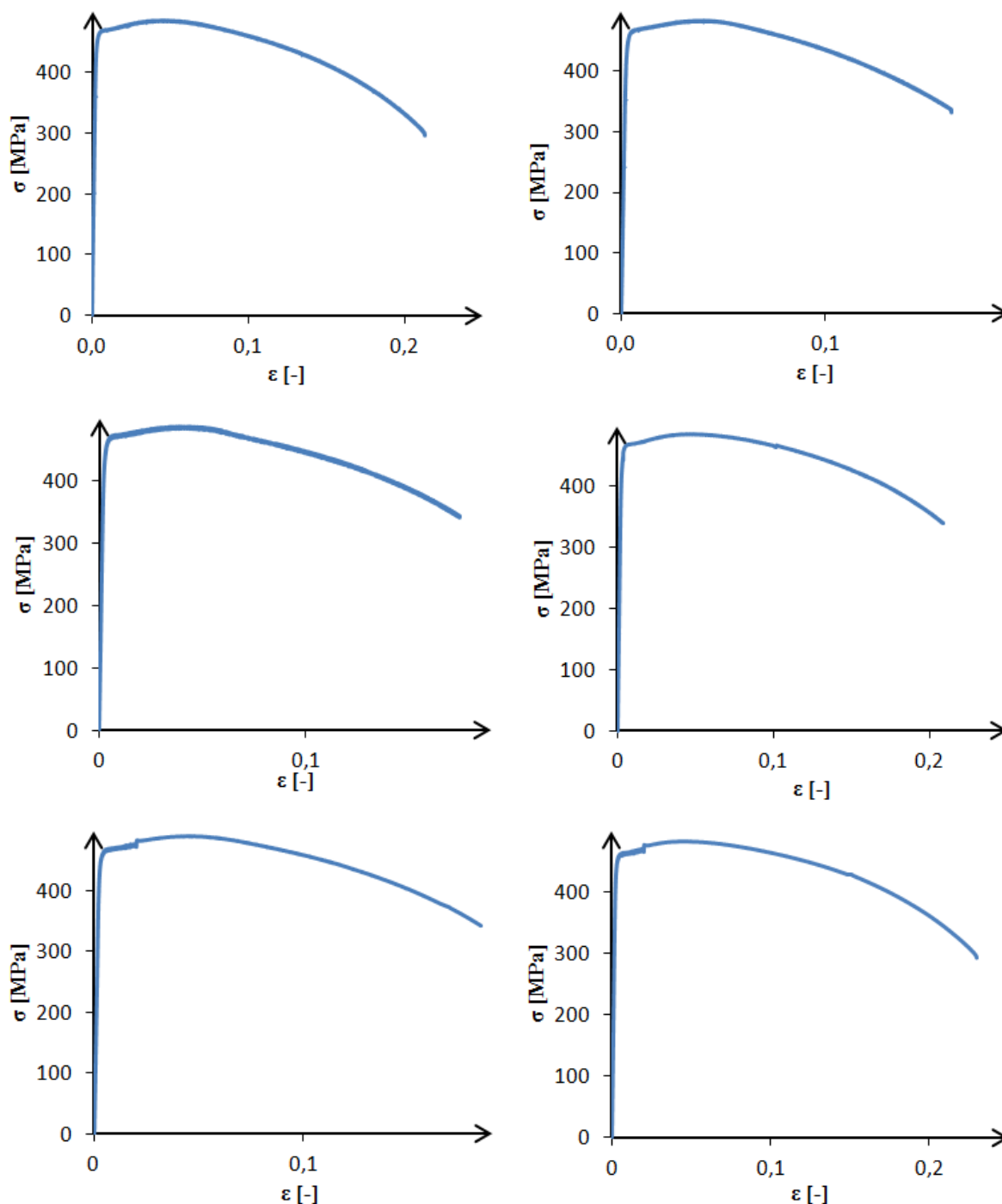


Obr. 7.1 Silový rám Bi-01-102 – AT [13]

K zjištění těchto charakteristik je zapotřebí měřit velmi malá prodloužení, řádově 10^{-6} až 10^{-7} m. K tomu se používají speciální přístroje nazývané extenzometry, nebo též průtahoměry. Tato zařízení se upínají přímo na měřenou část zkušební tyče [5].

V našem případě byl použit extenzometr s měrnou délkou (vzdálenost mezi břity) 25 mm. Po dosažení plastického prodloužení, přesahující velikost plastického prodloužení na mez pevnosti byl extenzometr odpojen z důvodu zabránění jeho poškození při lomu zkušební tyče. Další prodloužení zkušební tyče bylo odvozeno z pohybu čelistí [8].

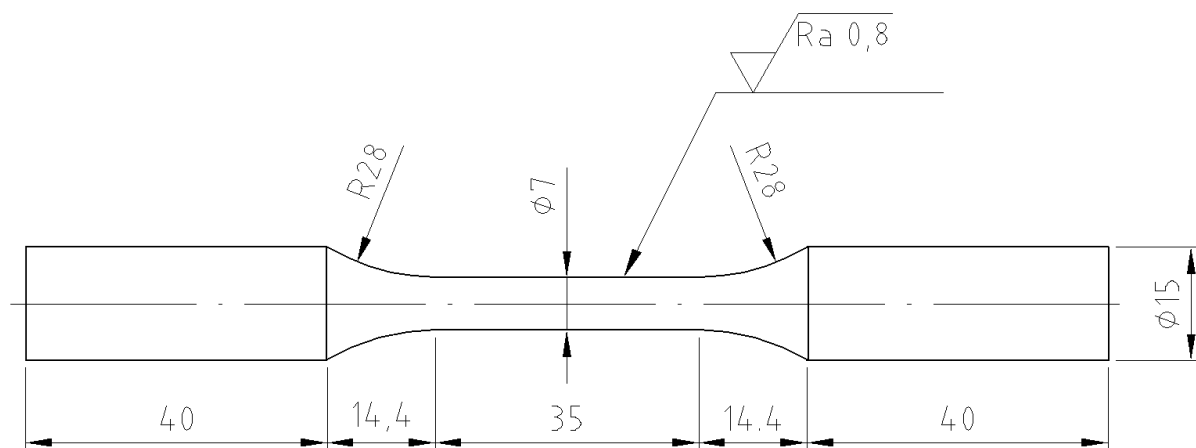
Z výstupních veličin zkušebního stroje, tedy ze zatěžující síly a celkového prodloužení zkušební tyče, jsem dle vztahů (11) a (6) vypočítal napětí a deformaci a vykreslil jejich závislost (tahový diagram $\sigma - \varepsilon$).



Graf 7.1 Diagramy $\sigma - \varepsilon$ tahových zkoušek

7.1 Zkoušený materiál

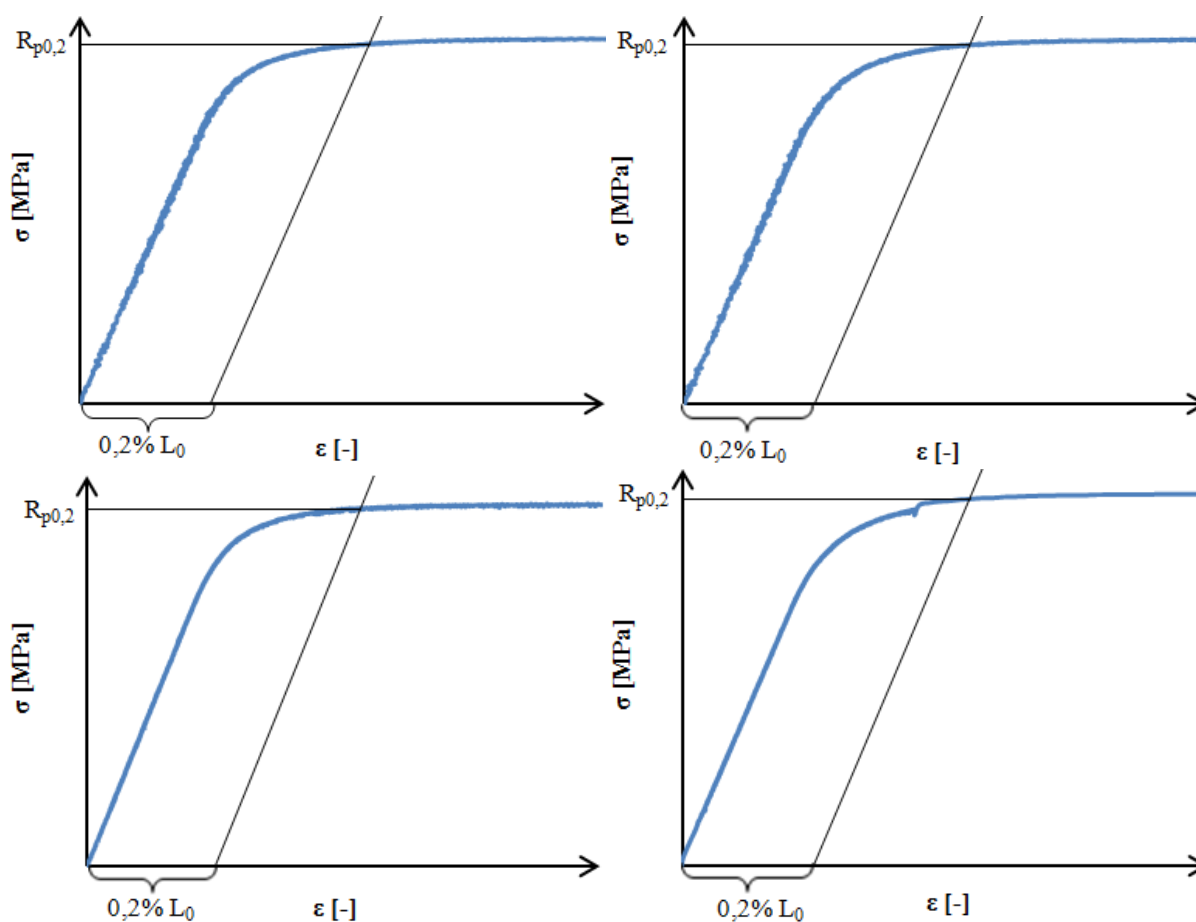
Zkušební vzorkem byla tyč válcovaná za tepla znázorněná na Obr. 7.2. Materiálem zkušební tyče byla konstrukční nelegovaná ocel S235JRC+C (1.0122). Jedná se o ocel se zaručenou svařitelností, a jejíž předepsané mechanické vlastnosti jsou: $R_m = 470 - 840 \text{ MPa}$, $R_{p0,2} = \min. 355 \text{ MPa}$, $A = \min. 8 \%$ [14].



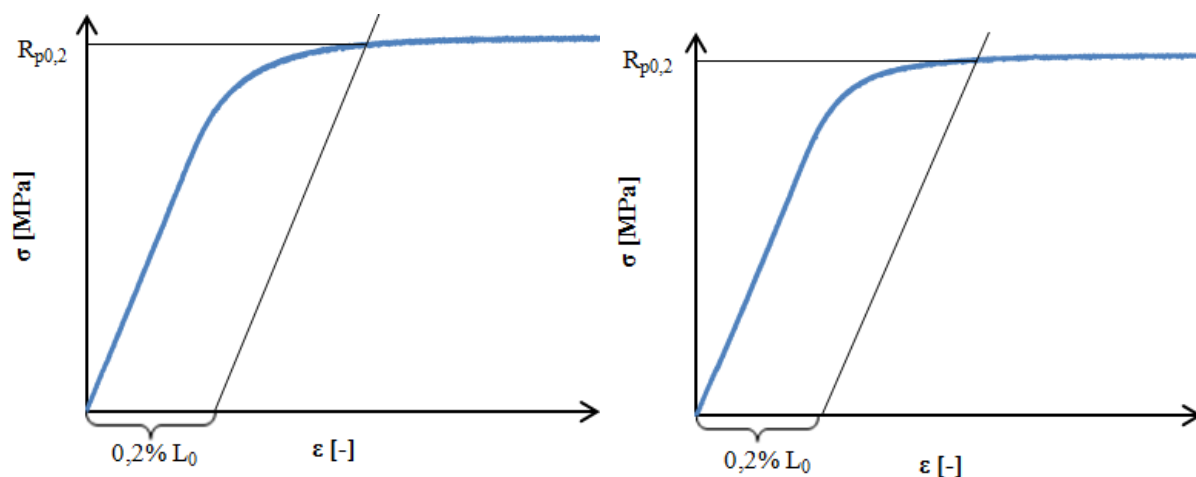
7.2 Výkres zkušební vzorku

7.2 Mez kluzu

Vzhledem k tomu, že materiál vykazuje známky plynulého přechodu z elastické do elasticko-plastické deformace, což je možné vidět na tahových diagramech (Graf 7.2), musí být mez kluzu určena smluvně pomocí plastického prodloužení v souladu s kapitolou 4.4.4 [1, 5].



Graf 7.2.1 Určování smluvní meze kluzu $R_{p0,2}$ z tahového diagramu $\sigma - \varepsilon$



Graf 7.2.2 Určování smluvní meze kluzu $R_{p0,2}$ z tahového diagramu $\sigma - \varepsilon$

Hodnoty meze kluzu zkoušeného materiálu jsou uvedeny v Tab. 7.1.

měření	$R_{p0,2}$ [MPa]
1	464
2	462
3	462
4	463
5	463
6	458

Tab. 7.1 Určené hodnoty smluvní meze kluzu $R_{p0,2}$

7.3 Mez pevnosti

Mez pevnosti byla určena v souladu s kapitolou 4.4.5, jako největší napětí předcházející porušení zkušební tyče a byla odečtena z tahového diagramu. Odečtené hodnoty meze pevnosti byly zapsány do Tab. 7.2 [1, 5].

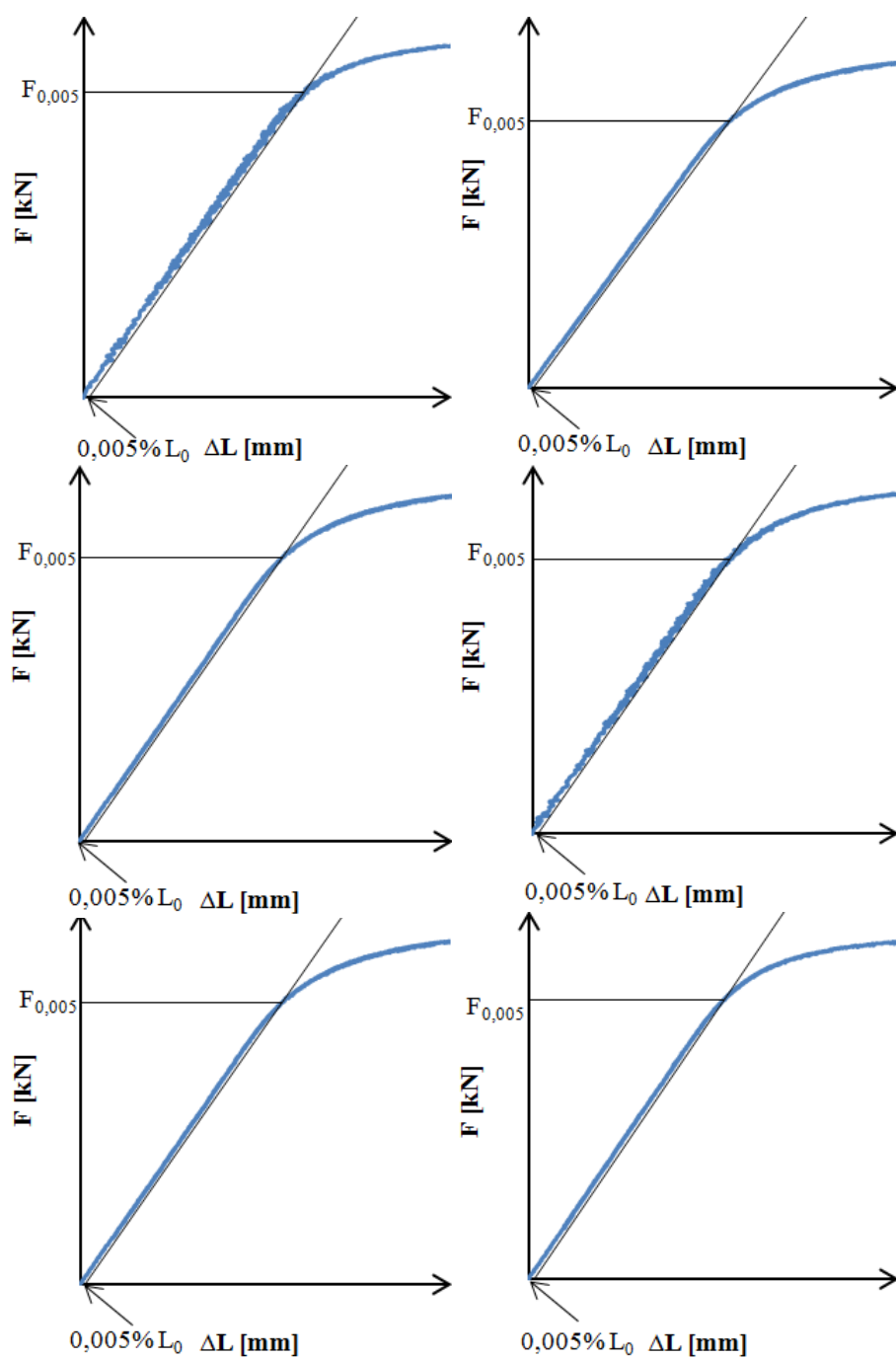
měření	R_m [MPa]
1	487
2	484
3	485
4	486
5	490
6	483

Tab. 7.2 Určené hodnoty meze pevnosti R_m

7.4 Mez úměrnosti

Mez úměrnosti byla určena v souladu s kapitolou 4.4.3 jako největší napětí, při kterém ještě platí Hookův zákon. Můžeme ji tedy přibližně brát za totožnou s mezí pružnosti, a určit ji tak v souladu s kapitolou 4.4.2 [1, 5].

Hodnoty meze úměrnosti jsou zaznamenány v Tab. 7.3.



7.3 Určování meze úměrnosti R_U z tahového diagramu $F - \Delta L$

měření	R_U [MPa]
1	395
2	366
3	372
4	364
5	395
6	374

Tab. 7.3 Určené hodnoty meze úměrnosti R_U

7.5 Modul pružnosti

Modul pružnosti byl určen v souladu s kapitolou 4.4.1, jako odpor materiálu vůči elastické deformaci.

Vypočítané hodnoty modulu pružnosti byly zaznamenány do Tab. 7.4 [1, 5].

měření	E [GPa]
1	182,8
2	190
3	190,4
4	191,5
5	186,3
6	197,8

Tab. 7.4 Vypočítané hodnoty Youngova modulu pružnosti E

7.6 Tažnost

Tažnost byla určena v souladu s kapitolou 4.5.1 jako poměrné podélné trvalé prodloužení zkušební tyče po přetržení vyjádřené v procentech počáteční měřené délky $L_0 = 25$ mm. Podélné trvalé prodloužení ΔL zkušební tyče bylo určeno tenzometrem.

Výsledky vypočítané tažnosti jsou zaznamenány v Tab. 7.5 [1, 5].

měření	A [%]
1	21,3
2	-
3	17,6
4	20,9
5	-
6	23

Tab. 7.5 Vypočítané hodnoty tažnosti A

U měření číslo 2 a 5 nemohla být vyhodnocena tažnost, protože vzorky nebyly přetrženy.

7.7 Kontrakce

Kontrakce byla určena v souladu s kapitolou 4.5.2 jako největší poměrné trvalé zúžení průřezu zkušební tyče. Toto zúžení bylo změřeno jako průměr v místě nejmenšího průřezu po přetržení zkušební tyče. Tento průměr byl pro každé zkušební těleso změřen vícekrát, vždy v jiném smyslu natočení zkušební tyče. Z těchto naměřených průměrů byl vypočten aritmetický průměr d_u , jehož hodnota byla dosazena do vztahu (46). Jako počáteční průměr zkušební tyče byla brána hodnota $d_0 = 7$ mm.

Výsledky vypočtené tažnosti pak byly zapsány do Tab. 7.6 [1, 5].

měření	d_{u1} [mm]	d_{u2} [mm]	d_{u3} [mm]	d_{u4} [mm]	d_{u5} [mm]	d_{u6} [mm]	d_u [mm]	Z [%]
1	4,12	4,3	4,1	4,28	4,28	4,2	4,21	63,8
2	-	-	-	-	-	-	-	-
3	4,16	4,22	4,1	4,1	4,12	4,18	4,15	64,9
4	4,06	4,02	4,08	4,02	4,04	4,02	4,04	66,7
5	-	-	-	-	-	-	-	-
6	4,10	4,30	4,11	4,24	4,16	4,12	4,17	64,5

Tab. 7.6 Výpočet kontrakce Z

U měření číslo 2 a 5 nemohla být vyhodnocena kontrakce, protože vzorky nebyly přetrženy.

7.8 Exponent a koeficient deformačního zpevnění

Exponent deformačního zpevnění n a koeficient deformačního zpevnění k , byly vypočítány v souladu s kapitolou 3.5 s použitím metody nejmenších čtverců a využitím vztahu (32)

$$\log \bar{\sigma} = \log k + n \cdot \log \bar{\varepsilon}_{pl}$$

Aproximací $y = \log \bar{\sigma}$, $A = \log k$, $B = n$, $x = \log \bar{\varepsilon}_{pl}$ dostaneme rovnici přímky

$$y = A + B \cdot x$$

Pro množinu bodů $[x_i; y_i]$ rovnici řešíme metodou nejmenších čtverců, tedy platí

$$\begin{aligned} A \cdot (n+1) + B \cdot \sum_{i=1}^n x_i &= \sum_{i=1}^n y_i \\ A \cdot \sum_{i=1}^n x_i + B \cdot \sum_{i=1}^n x_i^2 &= \sum_{i=1}^n x_i \cdot y_i \end{aligned}$$

Po dosazení za $x_i; y_i$ dostáváme soustavu dvou lineárních rovnic o dvou neznámých

$$\begin{aligned} 1245 \cdot A - 2537,1 \cdot B &= 3335,59 \\ -2537,1 \cdot A + 5762,7 \cdot B &= -6784,24 \end{aligned}$$

jejímž řešením je

$$\begin{aligned} A &= 2,72 \\ B &= 0,022 \end{aligned}$$

a po vracení aproximace dostaneme

$$\begin{aligned} k &= 10^A = 10^{2,72} = 524,8 \\ n &= B = 0,022 \end{aligned}$$

Výpočet k a n u ostatních tahových zkoušek, byl proveden obdobně. Výsledky takto vypočítaných koeficientů k a exponentů n deformačního zpevnění jsou zaznamenány v Tab. 7.7 [1, 5, 15].

měření	k	n
1	524,8	0,022
2	562,34	0,051
3	549,5	0,036
4	537	0,034
5	524,8	0,023
6	537	0,03

Tab. 7.7 Vypočítané hodnoty koeficientu k a exponentu n deformačního zpevnění

7.9 Výsledky tahové zkoušky

Výsledky mechanických charakteristik zkoušeného materiálu ze všech tahových zkoušek jsou spolu s hodnotami aritmetických průměrů, směrodatných odchylek a odhadem nejistoty měření pro jednotlivé vyhodnocované charakteristiky zaznamenány v následující tabulce.

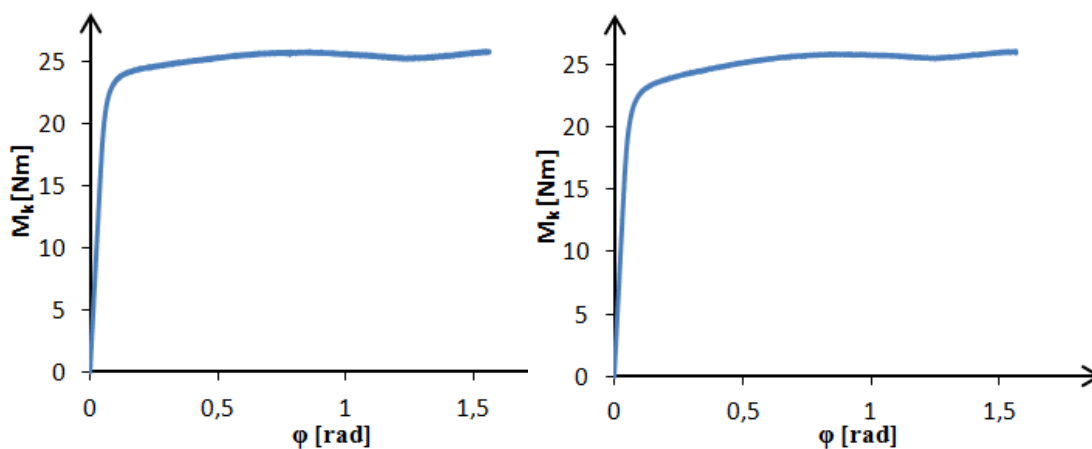
měření	$R_{p0,2}$ [MPa]	R_m [MPa]	R_U [MPa]	E [GPa]	A [%]	Z [%]	k [-]	n [-]
1	464	487	395	182,8	21,3	63,8	524,8	0,022
2	462	484	366	190	-	-	562,34	0,051
3	462	485	372	190,4	17,6	64,9	549,5	0,036
4	463	486	364	191,5	20,9	66,7	537	0,034
5	463	490	395	186,3	-	-	524,8	0,023
6	458	483	374	197,8	23	64,5	537	0,030
\bar{x}	462	485,83	377,67	189,8	20,7	65	539,24	0,033
s	1,92	2,81	12,61	4,62	1,96	1,07	13,33	0,008
u	0,78	1,15	5,15	1,89	0,98	0,54	5,44	0,003

Tab. 7.8 Shrnutí výsledků tahových zkoušek

8 Charakteristiky zkoušky krutem

Zkouška jednoosým krutem byla provedena za pokojové teploty a s použitím stejného stroje, jako zkouška tahová. Cílem této zkoušky bylo určení závislosti krouťicího momentu M_k na úhlu zkroucení φ zkušební vzorku (Graf 8.1) a zjištění deformačních charakteristik zkoušeného materiálu, zejména meze kluzu v krutu τ_K , meze pevnosti v krutu τ_P , meze pružnosti v krutu τ_U a modulu pružnosti ve smyku. Tyto mechanické charakteristiky se určují obdobně jako u tahové zkoušky.

Jelikož se v našem případě jedná o materiál, který se poruší důsledkem krutu až po větším natočení, než zvládne náš zkušební stroj (maximální natočení 90°), nemůže být mez pevnosti v krutu τ_P určena a k porušení materiálu v důsledku krutu nedojde. V důsledku toho se v práci dále budu zabývat jen elastickou částí diagramu [1, 13].



Graf 8.1 Závislosti $M_k - \varphi$ zkoušek jednoosým krutem

8.1 Mez kluzu

Zjišťování meze kluzu v krutu, podle celkové trvalé deformace jako v případě tahu, je obtížné, protože při nerovnoměrnosti napětí po průřezech v pružném stavu se plastická deformace rozvíjí nerovnoměrně, tedy některé části průřezu zůstávají napjaty pružně. Počáteční lineární část diagramu (elastická) $\tau - \gamma$ je totožná s elastickou částí diagramu $M_k - \varphi$ a pro smykové napětí τ platí Hookův zákon

$$\tau = G \cdot \gamma \quad (63)$$

a po úpravě vztahu dostaneme

$$\frac{M_k \cdot 2}{\pi R^3} = G \cdot \gamma \quad (64)$$

Dále vyjdeme ze vztahu

$$\varphi = \frac{M_K \cdot l}{G \cdot J_p} \quad (65)$$

který ovšem platí jen v případě konstantního průřezu prutu a dosadíme za něj vztah (49) a po úpravě dostaneme vztah

$$\varphi = \frac{2M_K \cdot l_0}{G \cdot \pi R^4}$$

Tento vztah ovšem platí v případě, pokud jsou všechno konstanty. V našem případě se ale R mění po délce střednice $R(x)$, tedy musíme vzít nekonečně krátký element střednice a na něm určit

$$d\varphi = \frac{2M_K \cdot dx}{G \cdot \pi R^4}$$

a pokud se pohybujeme v lineárně elastické oblasti, jsou kromě R všechno konstanty, tedy můžeme počítat

$$\varphi = \int_0^L \frac{2M_K \cdot dx}{G \cdot \pi R(x)^4} = \frac{2M_K}{G \cdot \pi} \int_0^L \frac{dx}{R(x)^4} \quad (66)$$

Abychom se zbavili modulu průřezu ve smyku G , dosadíme za M_K vztah (64) a po úpravě dostaneme

$$\varphi = r^3 \cdot \gamma \cdot \int_0^L \frac{dx}{R(x)^4}$$

Jelikož φ odpovídá natočení konců zkušební tyče uchycené v čelistech zkušebního stroje, a v polovině délky zkušební tyče je poloviční natočení $\frac{\varphi}{2}$, potom můžeme psát

$$\frac{\varphi}{2} = r^3 \cdot \gamma \cdot \int_0^{\frac{L}{2}} \frac{dx}{R(x)^4} \quad (67)$$

kde jedinou neznámou je zkos γ .

Nyní už jen stačí vyjádřit hodnotu integrálu. K tomu je zapotřebí vědět průběh $R(x)$ (obr. 7.2). Tuto změnu poloměru po délce střednice budeme brát pro zjednodušení na úseku délky 14,4 mm jako změnu lineárně klesající. Na úseku délky 17,5 mm se pak už R nemění. Tedy bude platit

$$\int_0^{\frac{L}{2}} \frac{dx}{R(x)^4} = \int_0^{14,4} \frac{dx}{(a - bx)^4} + \int_0^{17,5} \frac{dx}{r^4}$$

Tento integrál vyřešíme zavedením substituce $t = a - bx$ a po provedení integrace a vrácení substituce dostaneme hodnotu tohoto integrálu

$$\int_0^{\frac{L}{2}} \frac{dx}{R(x)^4} = \frac{1}{3b} \left[\frac{1}{(a - bx)^3} \right]_0^{14,4} + \left[\frac{x}{r^4} \right]_0^{17,5}$$

Po vyjádření konstant rovnice přímky $a = 7,5$, $b = 5/18$ a jejich dosazení dostaneme hodnotu integrálu

$$\int_0^{\frac{L}{2}} \frac{dx}{R(x)^4} = \frac{248}{1715} \cong 0,1446$$

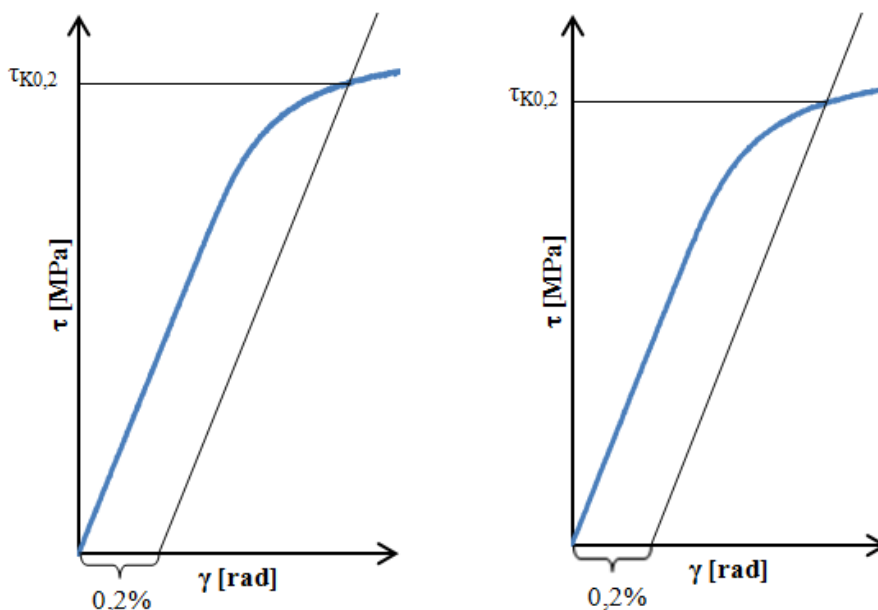
Pak už jen ze vztahu (67) vyjádříme

$$\gamma = \frac{\varphi \cdot 1715}{2r^3 \cdot 248}$$

a po dosazení za $r = 3,5$ (poněvadž se týká napětí na povrchu průřezu v polovině vzorku) dostaneme

$$\gamma = \frac{5}{62} \varphi$$

Tento vztah pak použijeme pro přepočet natočení φ na zkos γ a můžeme tak vykreslit část diagramu $\tau - \gamma$ pro určení smluvní meze kluzu v krutu $\tau_{K0,2}$.



Graf 8.2 Určování meze kluzu v krutu $\tau_{K0,2}$

měření	$\tau_{K0,2}$ [MPa]
1	340
2	325

Tab. 8.1 Určené hodnoty meze kluzu v krutu $\tau_{K0,2}$

Jelikož je určení meze kluzu u krutu velmi komplikované a mechanismus porušení je ovlivněn mnoha faktory, které výše uvedený výpočet není schopen zahrnout, budeme uvažovat, že napětí v průřezu vzorku není konstantní a použijeme τ_{ef} jako hodnotu průměrného napětí v průřezu

$$\tau_{ef} = \frac{\int_0^R \frac{\tau_K}{R} \rho \cdot 2\pi\rho d\rho}{\pi R^2} = \frac{2}{3} \tau_K \quad (68)$$

kde mez kluzu τ_K je napětí na povrchu. Následující tabulka pak udává přepočtené hodnoty meze kluzu z tabulky 8.1 na efektivní napětí τ_{ef} .

měření	τ_{ef} [MPa]
1	227
2	216

Tab. 8.2 Vypočítané hodnoty průměrného napětí v průřezu τ_{ef}

Dle Trescovy podmínky plasticity můžeme mez kluzu v krutu přepočítat na mez kluzu v tahu

$$\sigma_K = \frac{\tau_K}{0,5} = 2\tau_K = 2\tau_{ef}$$

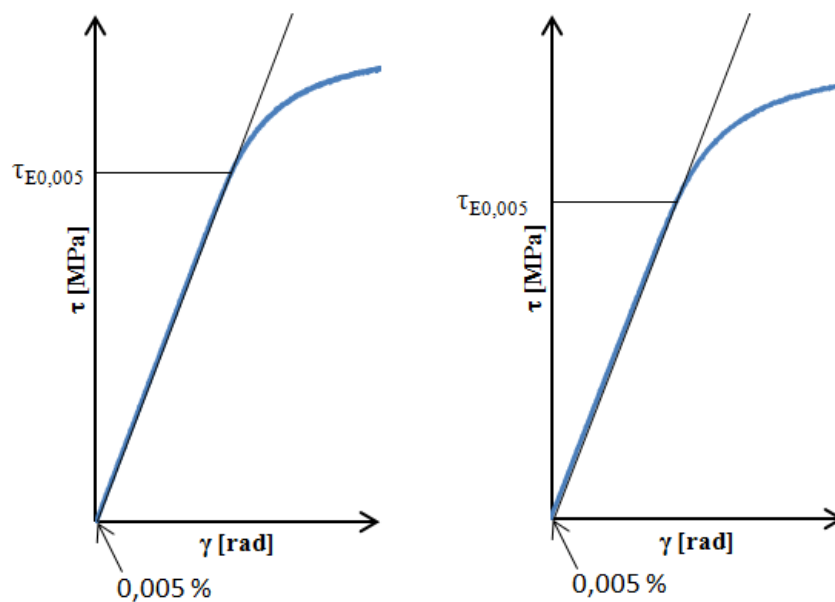
kde za τ_K dosadíme právě hodnotu efektivního napětí. Trescova podmínka plasticity se používá spíše na přepočet meze kluzu v tahu na mez kluzu v krutu, kterou zpravidla v materiálových listech nenalezneme. V našem případě ji však použijeme obráceně, abychom následně mohli porovnat meze kluzu získané různými způsoby měření [6, 7, 16].

měření	σ_K [MPa]
1	454
2	432

Tab. 8.3 Vypočítané hodnoty meze kluzu v tahu σ_K

8.2 Mez pružnosti

Mez pružnosti v krutu $\tau_{E0,005}$ byla určena obdobně jako mez kluzu v krutu [6, 7].



Graf 8.3 Určování meze pružnosti v krutu $\tau_{E0,005}$

měření	$\tau_{E0,005}$ [MPa]
1	268
2	245

Tab. 8.4 Určené hodnoty meze pružnosti v krutu $\tau_{E0,005}$

8.3 Modul pružnosti ve smyku

Při určování modulu pružnosti ve smyku vyjdeme ze vztahu (66), ze kterého s využitím vztahu (67) vyjádříme

$$G = \frac{4M_K}{\varphi \cdot \pi} \int_0^{\frac{L}{2}} \frac{dx}{R(x)^4}$$

a po dosazení příslušného kroutícího momentu M_K a natočení φ [rad] na mezi pružnosti dostaneme velikost modulu pružnosti ve smyku.

měření	G [GPa]
1	70,5
2	71,8

Tab. 8.5 Vypočítané hodnoty modulu pružnosti ve smyku G

Modul pružnosti ve smyku můžeme přepočítat na modul pružnosti v tahu dle vztahu (20), za účelem porovnání dvou hodnot získaných různým způsobem měření.

$$E = 2G(1 + \mu)$$

kde Poissonův poměr bereme pro ocel jako konstantu $\mu = 0,3$ [1, 6].

měření	E [GPa]
1	183,3
2	186,7

Tab. 8.6 Vypočítané hodnoty Youngova modulu pružnosti v tahu E

Výsledky zkoušky krutem

Výsledky mechanických charakteristik zkoušeného materiálu z obou zkoušek krutem jsou spolu s hodnotami aritmetických průměrů, směrodatných odchylek a odhadem nejistoty měření pro jednotlivé vyhodnocované charakteristiky zaznamenány v následující tabulce.

měření	$\tau_{K0,2}$ [MPa]	τ_{ef} [MPa]	σ_K [MPa]	$\tau_{E0,005}$ [MPa]	G [GPa]	E [GPa]
1	340	227	454	268	70,5	183,3
2	325	216	432	245	71,8	186,7
\bar{x}	332,5	221,5	443	256,5	71,2	185
s	7,5	5,5	11	11,5	0,7	1,7
u	5,3	3,9	7,8	8,1	0,5	1,2

Tab. 8.7 Shrnutí zkoušek krutem

8.4 Porovnání výsledků

Pro srovnání hodnot meze kluzu a Youngova modulu pružnosti zjištěných dvěma různými způsoby (tahovou zkouškou a zkouškou krutem) použijeme Studentův test. Cílem testu je otestovat hypotézu na hladině významnosti α , že rozdílné metody jejich určování nemají vliv na střední hodnotu těchto mechanických charakteristik. Do vzorce (60) tedy dosadíme za $\mu_0 = 0$. Hypotéza byla testována v souladu s kapitolou 6.2 a výsledky byly zaznamenány do tabulek 8.8 a 8.9.

Ukázka výpočtu:

Na hladině významnosti $\alpha = 0,05$ otestujeme hypotézu, že rozdíl středních hodnot určených veličin získaných různými metodami je nulový. Přičemž předpokládáme, že se jedná o dva statistické soubory s různými rozptyly. Pozorovaným parametrem bude dle vztahu (60)

$$t = \frac{\bar{x} - \bar{y} - \mu_0}{\sqrt{\frac{s^2(x)}{n_1-1} + \frac{s^2(y)}{n_2-1}}} = \frac{462 - 443 - 0}{\sqrt{\frac{3,6864}{6-1} + \frac{121}{2-1}}} \approx 1,72$$

kde \bar{x} je aritmetický průměr meze kluzu určené zkouškou tahem, \bar{y} je aritmetický průměr meze kluzu určené zkouškou krutem, μ_0 je rozdíl středních hodnot, $s^2(x)$ je rozptyl naměřené meze kluzu při zkoušce tahem, $s^2(y)$ je rozptyl naměřené meze kluzu při zkoušce krutem, n_1 je počet tahových zkoušek a n_2 je počet zkoušek krutem.

Pro hodnotu t , aby nebyla hypotéza na hladině α zamítnuta, musí platit

$$t \in \bar{W}_\alpha = \langle -\bar{t}_{1-\alpha/2}; \bar{t}_{1-\alpha/2} \rangle$$

kde $\bar{t}_{1-\alpha/2}$ spočítáme dle vztahu (62) jako

$$\bar{t}_{1-\alpha/2} = \frac{\frac{s^2(x)}{n_1-1} \cdot t(x) + \frac{s^2(y)}{n_2-1} \cdot t(y)}{\frac{s^2(x)}{n_1-1} + \frac{s^2(y)}{n_2-1}}$$

kde pro $k = n_1 - 1 = 6 - 1 = 5$ dostaneme $t(x) = 2,571$ a pro $k = n_2 - 1 = 2 - 1 = 1$ dostaneme $t(y) = 12,706$. Potom

$$\bar{t}_{0,975} = \frac{\frac{3,6864}{6-1} \cdot 2,571 + \frac{121}{2-1} \cdot 12,706}{\frac{3,6864}{6-1} + \frac{121}{2-1}} = 12,64$$

a kritický obor je tedy

$$\bar{W}_\alpha = \langle -12,64; 12,64 \rangle$$

Jelikož $t \in \bar{W}_\alpha$, hypotézu nezamítám na hladině významnosti $\alpha = 0,05$, tím pádem rozdílné metody určování meze kluzu nemají vliv na její střední hodnotu.

α	0,1	0,05	0,02	0,01	0,002	0,001
Hypotézu	nezamítám	nezamítám	nezamítám	nezamítám	nezamítám	nezamítám

Tab. 8.8 Výsledky testu hypotézy porovnávající středních hodnot meze kluzu σ_k zjištěné zkouškou jednoosým tahem a krutem

α	0,1	0,05	0,02	0,01	0,002	0,001
Hypotézu	nezamítám	nezamítám	nezamítám	nezamítám	nezamítám	nezamítám

Tab. 8.9 Výsledky testu hypotézy porovnávající středních hodnot Youngova modulu pružnosti E zjištěného zkouškou jednoosým tahem a krutem

Z výsledků testů vyplývá, že testovanou hypotézu jsme na žádné hladině významnosti α nezamítli. Můžeme tedy říci, že rozdílné metody určování meze kluzu v tahu σ_k a Youngova modulu pružnosti v tahu E nemají vliv na jejich určenou střední hodnotu. Při větším počtu zkoušek bychom však mohli dostat výsledky jiné a toto tvrzení by již nemuselo být pravdivé [12].

Závěr

Cílem této bakalářské práce bylo zpracování, vyhodnocení a porovnání výsledků experimentálních zkoušek kovových vzorků monotónně namáhaných jednoosým tahem a krutem.

Práce má dvě hlavní části. V první části byla provedena rešerše v oblasti namáhání těles. Dále byly popsány základní mechanické charakteristiky, které se na základě zkoušky jednoosým tahem a krutem určují.

Ve druhé části této práce se zaměřujeme na samotné zpracování výsledků těchto experimentálních zkoušek. Aby bylo možné výsledky obou zkoušek porovnávat, byl pro oba případy zkoušení použit tentýž testovací vzorek vyrobený z konstrukční oceli S235JRC+C. Všechny zkoušky byly realizovány na axiálně-krutovém testovacím stroji společnosti BiSS. Celkem bylo provedeno 6 tahových a 2 krutové zkoušky.

U tahových zkoušek byla určena především smluvní mez kluzu $R_{p0,2}$, mez pevnosti R_m a tažnost A . Porovnáním těchto zjištěných hodnot s hodnotami předepsanými normami zjistíme, že u všech vzorků byly tyto mechanické charakteristiky dosaženy. Dále byly určeny meze úměrnosti R_U , moduly pružnosti E , kontrakce Z , koeficienty a exponenty deformačního zpevnění k a n .

Určování mechanických charakteristik ze zkoušek krutem bylo omezeno do určité míry testovacím strojem. Toto zařízení totiž nedokáže čelisti natáčet vůči sobě libovolně, ale jen do omezeného úhlu natočení $\varphi \cong 90^\circ$. Jelikož byla zkoušeným materiálem tvárná ocel, nemohlo být při tomto úhlu natočení φ dosaženo meze pevnosti v krutu τ_P . Z těchto zkoušek tedy byla určena především smluvní mez kluzu v krutu $\tau_{K0,2}$ a modul pružnosti ve smyku G . Tyto dvě charakteristiky byly následně přepočteny na mez kluzu v krutu σ_k a modul pružnosti v tahu E . Důvodem toho bylo porovnání výsledků s tahovou zkouškou. Bylo zjištěno, že rozdílné metody určování σ_k a E nemají vliv na jejich určenou střední hodnotu. Tato informace však může být zavádějící, neboť jsme byli omezeni malým počtem zkoušek.

Seznam použitých zdrojů

- [1] Veles P.: *Mechanické vlastnosti a skúšanie kovov*, ALFA/SNTL Bratislava, 1985, 401 s. ČSN EN ISO 6892-1
- [2] PTÁČEK, Luděk. *Nauka o materiálu I*. 2. opr. a rozš. vyd. Brno: CERM, 2003, 516 s. ISBN 80-720-4283-1.
- [3] PTÁČEK, Luděk. *Nauka o materiálu II*. 2. opr. a rozš. vyd. Brno: CERM, 2002, 392 s. ISBN 80-7204-248-32.
- [4] JAREŠ, Vojtěch. *Základní zkoušky kovů a jejich teorie*. Praha: Academia, 1966, 209 s. ISBN 21-041-66.
- [5] POKLUDA, Jaroslav. *Mechanické a strukturní materiálové charakteristiky*. Vyd. 1. Brno: Rektorát Vysokého učení technického v Brně, 1990, 211 s. Učební texty vysokých škol (Vysoké učení technické v Brně). ISBN 80-214-0078-1.
- [6] JANÍČEK, Přemysl, Emanuel ONDRÁČEK a Jan VRBKA. *Mechanika těles: pružnost a pevnost I*. 3., přeprac. vyd., v Akademickém nakl. CERM 1. Brno: CERM, 2004, 287 s. Učební texty vysokých škol (Vysoké učení technické v Brně). ISBN 80-214-2592-X.
- [7] VRBKA, Jan. *Pružnost a pevnost I*. Brno, 2012. Investice do rozvoje a vzdělávání: Učební text, 280 s.
- [8] MOLLIKOVÁ, Eva. *Zkoušení materiálů a výrobků: Zkouška tahem* [online]. [cit. 2014-03-11]. Dostupné z: <http://ime.fme.vutbr.cz/images/umvi/opory/zmv/ZKOUSKA%20TAHEM.doc>
- [9] UNIVERZITA TOMÁŠE BATI VE ZLÍNĚ, Fakulta technologická. *Kontrolní a zkušební metody: Statické zkoušky krátkodobé* [online]. Zlín, 2011, 12.09.2011 [cit. 2014-03-25]. Dostupné z: http://ufmi.ft.utb.cz/texty/kzm/KZM_09.pdf
- [10] ČSN ISO 6892-1a. *Kovové materiály: zkoušení tahem: část 1: zkušební metoda za pokojové teploty*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2010.
- [11] ČSN ISO 7800a. *Kovové materiály: dráty: zkouška jednoosým krutem*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2012.
- [12] KARPÍŠEK, Zdeněk. *Matematika IV: statistika a pravděpodobnost*. 3. dopl. vyd. Brno: CERM, 2007, 170 s. ISBN 978-80-214-3380-9.
- [13] INDUSTAR-M. *Manuál k použití: Axiálně-krutový servo-elektrický testovací systém - Hardware* [CD]. 18 s.
- [14] Dr. Wilhelm Mertens GmbH. *EN 10277-2: unlegierter Baustahl* [online]. [cit. 2014-04-30]. Dostupné z: http://www.mertens-stahl.de/fileadmin/files/mertens-stahl.de/documents/Datenblaetter/Blankstahl/1.0122_St37K__gezogen.pdf

[15] ČERMÁK, Libor, Rudolf HLAVIČKA a Richard G BUDYNAS. *Numerické metody*. Vyd. 2. Editor Martin Hartl, Miloš Vlk. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2008, 110 s. ISBN 978-80-214-3752-4.

[16] ŠAPOŠNIKOV, N. *Mechanické zkoušení kovů*. vyd. 1. Praha: SNTL, 1953, 402 s.

Seznam použitých symbolů a zkratek

A, B		konstanty
A_5	[%]	tažnost krátké zkušební tyče
A_{10}	[%]	tažnost dlouhé zkušební tyče
d	[mm]	měřený průměr tělesa
D	[MPa]	modul plastičnosti
d_u	[mm]	nejmenší průměr tělesa po přetržení
d_0	[mm]	počáteční průměr tělesa
dF	[N]	diferenciál výslednice sil
dS	[mm ²]	diferenciál plochy namáhaného řezu
dx, dy, dz	[mm]	rozměry elementární krychle
dx', dy', dz'	[mm]	rozměry deformované elementární krychle
E	[GPa]	Youngův modul pružnosti v tahu
F	[N]	síla
f_a	[MPa]	obecné napětí
F_f	[N]	skutečná síla v okamžiku lomu
F_m	[N]	síla na mezi pevnosti
F_n	[N]	normálová složka síly
F_U	[N]	síla na mezi úměrnosti
$F_{0,005}$	[N]	síla odpovídající smluvní mezi pružnosti
F_τ	[N]	smyková složka síly
G	[GPa]	Coulombův modul pružnosti ve smyku
J_p	[mm ⁴]	polární kvadratický moment
k		koeficient deformačního zpevnění
K	[GPa]	objemový modul pružnosti
L	[mm]	měřená délka po prodloužení
L_u	[mm]	délka zkušební tyče po přetržení
L_0	[mm]	počáteční délka
M_E	[Nm]	krouticí moment na mezi pružnosti
M_k	[Nm]	krouticí moment
M_K	[Nm]	krouticí moment na mezi kluzu
$M_{k \max}$	[Nm]	maximální krouticí moment
M_u	[Nm]	krouticí moment na mezi úměrnosti
n		exponent deformačního zpevnění
n_1, n_2		počet měření
R	[mm]	poloměr
R_e	[MPa]	nevýrazná mez kluzu
R_{eH}	[MPa]	horní mez kluzu
R_{eL}	[MPa]	dolní mez kluzu
R_m	[MPa]	mez pevnosti
R_p	[MPa]	smluvní mez kluzu
R_t	[MPa]	smluvní mez kluzu
R_U	[MPa]	mez úměrnosti
$R_{0,005}$	[MPa]	smluvní mez pružnosti
\bar{R}_f	[MPa]	skutečná pevnost
s		směrodatná odchylka
S	[mm ²]	plocha namáhaného řezu
S_0	[mm ²]	počáteční plocha namáhaného řezu
S_u	[mm ²]	skutečný průřez v okamžiku lomu

s^2		rozptyl
t		pozorovaná hodnota Studentova rozdělení
T_σ	[MPa]	tenzor napětí
$\bar{t}_{1-\alpha/2}$		kvantil Studentova rozdělení
T_ε		tenzor přetvoření
u		nejistota měření
V	[mm ³]	objem
W_k	[mm ³]	modul průřezu v krutu
W_{pl}	[kJ]	energie plastické deformace
\bar{W}_α		kritický obor
\bar{x}, \bar{y}		aritmetický průměr
Z	[%]	kontrakce
α	[deg]	natočení příčného průřezu vůči ose
$\alpha, \beta, \gamma, \delta, \varepsilon, \psi$	[deg]	úhly natočení deformované elementární krychle
α		hladina významnosti
γ	[rad]	zkos
$\gamma_{xy}, \gamma_{xz}, \gamma_{yz}$		úhlová přetvoření v obecném bodě tělesa
ΔL	[mm]	prodloužení
ΔL_{el}	[mm]	celkové pružné prodloužení
ΔS	[mm ²]	změna plochy namáhaného řezu
ΔV	[mm ³]	změna objemu
ε		celkové poměrné přetvoření
ε_{el}		elastické poměrné přetvoření
ε_{pl}		plastické poměrné přetvoření
ε_{pr}		deformace do meze pevnosti
ε_r		celková rovnoměrná deformace
$\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z$		délková přetvoření v obecném bodě tělesa
$\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$		hlavní poměrná pružná přetvoření
$\bar{\varepsilon}$		skutečná podélná deformace
$\bar{\varepsilon}_{pl}$		skutečná plastická deformace
ϑ_1	[deg]	úhel mezi lineární částí tah. diagramu a osou ε
κ	[GPa ⁻¹]	objemová stlačitelnost
μ		Poissonův poměr
μ_0		rozdíl středních hodnot
ρ	[mm]	vzdálenost krajního vlákna
σ	[MPa]	napětí
$\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$	[MPa]	normálová napětí působící na stěny elementární krychle
σ_0	[MPa]	hlavní normálové napětí
$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$	[MPa]	hlavní normálová napětí
$\bar{\sigma}$	[MPa]	skutečné napětí
τ_E	[MPa]	mez pružnosti v krutu
τ_K	[MPa]	mez kluzu v krutu
τ_m	[MPa]	mez pevnosti v krutu
τ_{max}	[MPa]	maximální smykové napětí
τ_u	[MPa]	mez úměrnosti v krutu
$\tau_{xy}, \tau_{xz}, \tau_{yz}$	[MPa]	smyková napětí působící na stěny elementární krychle
τ_1, τ_2, τ_3	[MPa]	hlavní smyková napětí
φ	[rad]	úhel natočení

ψ
 $\bar{\psi}$
 ψ_u

celkové poměrné příčné přetvoření
skutečná příčná deformace
poměrná trvalá deformace